ISSN 1992-5980



ВЕСТНИК

ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



Том 11
№ 5 (56)
2011

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2011

Т.11 № 5(56)

Теоретический и научно-практический журнал

Рекомендован ВАК для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума ВАК Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

Издается с 1999 г.

Выходит 8 раз в год
Июль – сентябрь 2011 г.

Учредитель – **Донской государственный технический университет**

Подписано в печать 22.08.2011.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Tahoma». Печать офсетная.
Усл.печ.л. 23,6. Тираж 1000 экз. Заказ №428. Цена свободная.

Адрес редакции:
344000, Россия, г.Ростов-на-Дону, пл.Гагарина, 1, тел. (863) 2-738-565.

Адрес издательского центра:
344000, г.Ростов-на-Дону, пл.Гагарина, 1, тел. (863) 2-738-741, 2-738-322.
http://www.donstu.ru/vestnik

Регистрационное свидетельство ПИ №ФС 77-35012 от 16.01.09.

СОДЕРЖАНИЕ

VESTNIK
of
DON STATE TECHNICAL UNIVERSITY
2011

V.11 № 5(56)

Theoretical and scientific-practical journal

Recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publications of the thesis research results for Doctor's and Candidate Degree (the solution of the Presidium of the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Education and Science Ministry, February 19, 2010, №6/6)

Founded in 1999

8 issues a year

July – September 2011

Founder – **Don State Technical University**

Passed for printing 22.08.2011.
Format 60X84/8. Font «Tahoma». Offset printing.
C.p.sh. 23,6. Circulation 1000 cop. Order 428. Free price.

Editorial Board's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: (863) 273-85-65

Publishing Centre's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: (863) 273-87-41, 273-83-22

http://vestnik.donstu.ru

Registration certificate ПИ № ФС 77-35012 от 16.01.09.

CONTENT

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.422.23

ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ У ЗАТУПЛЕННОЙ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ В КРИСТАЛЛЕ*

Д.Н. КАРПИНСКИЙ, С.В. САННИКОВ
(Южный федеральный университет),
Б.В. СОБОЛЬ
(Донской государственный технический университет)

Выполнен расчет эволюции пластической деформации у вершины трещины в кристалле α-Fe *в условиях плоской деформации (моды I и II). Получены временные распределения пластической деформации, эффективного сдвигового напряжения, коэффициента интенсивности напряжения. Проведено сравнение результатов расчетов для трещин с затупленной и острой вершинами.*
Ключевые слова: *вершина трещины, пластическая деформация, кристалл, дислокации, плоскости скола, системы легкого скольжения, коэффициент интенсивности напряжения.*

Введение. Оценивание влияния формы вершины трещины на характеристики разрушения является актуальной задачей физики прочности и механики разрушения. Выбор модели формы хрупкой трещины существенно влияет на результаты расчета распределения упругого напряжения и деформации в окрестности ее вершины. В простейшем случае трещины-разреза, когда пренебрегают радиусом кривизны вершины $\rho \to 0$, эти распределения можно представить в виде асимптотического ряда по степеням расстояния $r^{(k-1)/2}$ $(k \geq 0)$ от вершины до заданной точки [1, 2]. Пренебрежение членами ряда с $k < 0$ обусловлено условием ограниченности величин перемещений и энергии деформирования у вершины трещины. Расчеты показывают, что распределения напряжений и деформаций содержат лишь особенности в вершине $O\left(r^{-1/2}\right)$ при $k = 0$, которые могут исчезнуть при некотором распределении внешней нагрузки [3]. Кроме детального изучения главного члена асимптотики $(k = 0)$, содержащего особенность, в последние годы внимание исследователей привлекает учет несингулярных слагаемых упругого поля вблизи вершины трещины-разреза $(k \geq 1)$. В работах [4, 5] подробно исследован второй член асимптотики упругого напряжения (Т-напряжение), который в случае трещины-разреза не зависит от r. В этом случае Т-напряжение входит лишь в компоненту тензора напряжения, соответствующую растяжению или сжатию вдоль линии трещины. Расчеты показали, что учет несингулярной составляющей заметно изменяет условия роста трещины [4, 5].

Впервые оценка распределения упругого поля в полярных координатах r и ϕ у вершины хрупкой трещины с учетом ненулевой величины радиуса вершины ρ прямолинейной трещины получена в исследовании [6]. Однако позже была получена более точная формула для распределения компонент тензора напряжений у вершины [7]:

$$\sigma_r = \frac{K_{\rm I}}{4\sqrt{2\pi r}}\left[\varphi_1(\rho,r)\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - \psi_1(\rho,r)\cos\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right] - \frac{K_{\rm II}}{4\sqrt{2\pi r}}\left[\varphi_1(\rho,r)\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) + \psi_2(\rho,r)\sin\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right],$$
$$\sigma_\phi = \frac{K_{\rm I}}{4\sqrt{2\pi r}}\left[\varphi_2(\rho,r)\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + \psi_3(\rho,r)\cos\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right] - \frac{K_{\rm II}}{4\sqrt{2\pi r}}\left[\varphi_2(\rho,r)\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) + \psi_4(\rho,r)\sin\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right], \quad (1)$$
$$\tau_{r\phi} = \frac{K_{\rm I}}{4\sqrt{2\pi r}}\left[\varphi_3(\rho,r)\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) + \psi_5(\rho,r)\sin\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right] + \frac{K_{\rm II}}{4\sqrt{2\pi r}}\left[\varphi_3(\rho,r)\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) + \psi_6(\rho,r)\sin\left(\frac{3\phi}{2}\right)\right],$$

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 10-08-00839-а).

где $\varphi_1(\rho,r)=5-2\frac{\rho}{r}-3\left(\frac{\rho}{r}\right)^2$, $\varphi_2(\rho,r)=3+2\frac{\rho}{r}+3\left(\frac{\rho}{r}\right)^2$, $\varphi_3(\rho,r)=1+2\frac{\rho}{r}-3\left(\frac{\rho}{r}\right)^2$,

$$\psi_1(\rho,r)=1-\frac{7}{2}\frac{\rho}{r}+\frac{5}{2}\left(\frac{\rho}{r}\right)^3,\quad \psi_2(\rho,r)=1+\frac{1}{2}\frac{\rho}{r}+\frac{5}{2}\left(\frac{\rho}{r}\right)^3,\quad \psi_3(\rho,r)=1+\frac{3}{2}\frac{\rho}{r}-\frac{5}{2}\left(\frac{\rho}{r}\right)^3,$$

$$\psi_4(\rho,r)=3-\frac{21}{2}\frac{\rho}{r}+\frac{15}{2}\left(\frac{\rho}{r}\right)^3,\quad \psi_5(\rho,r)=3+\frac{3}{2}\frac{\rho}{r}+\frac{15}{2}\left(\frac{\rho}{r}\right)^3,\quad \psi_6(\rho,r)=3+\frac{9}{2}\frac{\rho}{r}-\frac{15}{2}\left(\frac{\rho}{r}\right)^3.$$

В формуле (1), аналогично исследованию [7], K_{I} и K_{II} – коэффициент интенсивности напряжения (КИН) эквивалентной трещины, т.е. острой трещины ($\rho \to 0$) с той же длиной и ориентацией, как затупленная трещина. Сравнение результатов [6, 7] с результатами расчета методом конечных элементов показало, что с увеличением доли моды II во внешней нагрузке точность аналитических формул для компонент тензора напряжений [7] выше.

Для хрупкой трещины эллиптической формы при смешанном нагружении условие катастрофического роста трещины зависит не от формы трещины, а лишь от радиуса ее вершины ρ [8], который можно оценить как

$$\rho = 16,21\gamma_s/\sigma_c. \tag{2}$$

Для α-Fe удельная поверхностная энергия γ_s=1,42 Дж/м^2 и σ_c=31,7 ГПа и оценка (2) дает ρ=0,726 нм (около 3 постоянных решетки). Отсюда следует, что хрупкую трещину в приближении механики сплошной среды, нужно рассматривать как разрез с $\rho\to0$ [8].

В последние десятилетия обозначился значительный прогресс в создании дислокационных моделей для пластической деформации у вершины трещины [9, 10]. Расчеты взаимодействия дислокации с трещиной-разрезом обнаружили явление экранирования дислокацией ее упругого поля, которое характеризуется снижением КИН по сравнению с КИН трещины без дислокаций. Позже эти расчеты были обобщены для случая клинообразного выреза [11, 12], хотя в этих работах получена корневая особенность распределения напряжения у вершины трещины, соответствующая особенности трещины-разреза. В работе [13] исследовано взаимодействие краевой дислокации с трещиной в форме сплюснутого эллипса. С использованием перехода к трещине-разрезу согласно исследованию [7] получены зависимости КИН от взаимного расположения трещины и дислокации и обнаружены положения дислокации, соответствующие максимальным эффектам экранирования (мода I) и антиэкранирования (мода II). В работе [14] исследованы зависимости КИН модели трещины, состоящей из двух лунок, от положения винтовой и краевой дислокаций относительно вершины. Здесь также получена корневая особенность в распределении напряжения в вершине трещины в форме двух лунок. Следует упомянуть также об оценках величины взаимодействия дислокации с трещиной, в вершине которой находится зона сцепления [15, 16]. В этих работах показано, что если модель трещины с особенностью по напряжениям (высокая величина сцепления) в вершине предсказывает экранирование или антиэкранирование в зависимости от знака вектора Бюргерса дислокации, то при низкой величине сцепления – всегда экранирование вне зависимости от знака вектора Бюргерса дислокации.

Расчет равновесной формы дислокационной пластической зоны у вершины трещины-разреза (см., например, [17]) показал, что компонента напряжения σ_{yy} на линии продолжения трещины достигает максимума на некотором расстоянии от ее вершины. А дислокации, испущенные из вершины, более эффективно экранируют упругое напряжение трещины, чем дислокационные диполи, расположенные вблизи вершины [18]. Другой особенностью распределения дислокаций в пластической зоне является подтвержденное расчетами существование свободной от дислокаций области, прилегающей непосредственно к вершине трещины.

Пластическая деформация у вершины трещины в нагруженном образце существенно затупляет трещину, а это влияет на условия зарождения дислокационных петель из нее [19]. Форма

вершины, в свою очередь, определяет распределение экранирующих дислокаций в пластической зоне. Взаимное влияние формы вершины трещины и распределение пластической деформации в ее окрестности существенно меняет оценку (2). В частности, взаимодействие трещины и пластической деформации у ее вершины определяет условие вязко-хрупкого перехода.

Цель наших исследований –сравнение эволюции пластической деформации у вершины трещины в ОЦК кристалле при учете затупленности вершины трещины, условий нагружения и систем дислокационного скольжения при пластической деформации. В дальнейшем ограничимся расчетами для кристалла α-Fe (моды I и II) в условиях плоской деформации.

Постановка задачи и метод решения. Рассмотрим плоские задачи об эволюции пластической деформации у вершины трещины длиной $2l$, расположенной в плоскостях скола {100} и {110} бесконечного ОЦК кристалла с постоянной решетки a (рис.1).

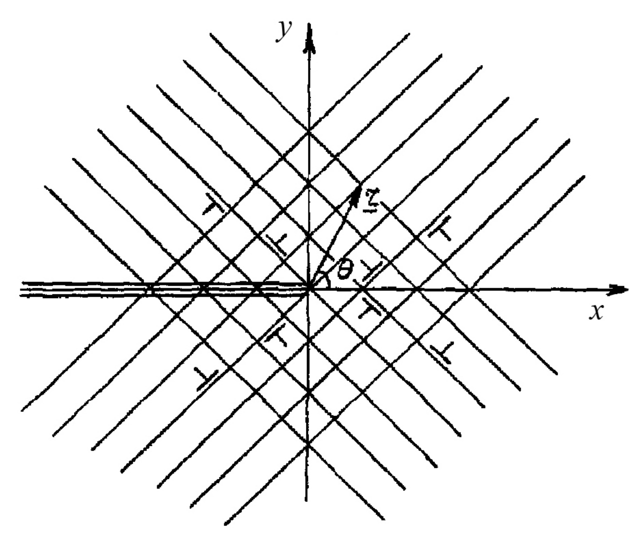


Рис.1. Кристаллографическая схема плоскостей легкого скольжения у вершины трещины

В первом случае выберем направление линии фронта трещины <001> и систему легкого скольжения <111> {110}. В ней пластическая деформация осуществляется путем термоактивированного движения смешанных дислокаций с вектором Бюргерса $\vec{b} = a/2 <111>$. Для трещины в плоскости {110} направления линий фронтов <111> и <110>, а системы легкого скольжения <111> {110} и <111> {112} соответственно (линии дислокаций параллельны фронтам трещины). Для этих систем скольжения пластическая деформация происходит с помощью тех же дислокаций, как и выше, но во втором случае дислокации чисто краевые. В расчетах учитываются только краевые компоненты смешанных дислокаций.

К плоскостям кристалла $y = \pm\infty$ приложены однородные напряжения растяжения $\sigma_{yy}(t) = \sigma_a(t)$ (мода I) и сдвига $\tau_{yy}(t) = \tau_a(t)$ (мода II), монотонно возрастающие до некоторых значений σ_{max}, τ_{max}, достаточных для пластического деформирования кристалла, но недостаточных для роста трещины. После достижения нагрузками $\sigma_a(t)$ и $\tau_a(t)$ своих максимальных значений расчет проводился в режиме релаксации напряжения у вершины трещины, которому соответствуют постоянные внешние напряжения. В данном расчете принята пропорциональность двух типов внешних нагрузок $\sigma_a(t) = k\tau_a(t)$, постоянная k является параметром задачи.

В кристалле равномерно распределены источники дислокаций, испускающие прямоугольные петли, лежащие в плоскостях легкого скольжения. В расчете учитываются только отрезки петель, перпендикулярные плоскости $0xy$, и их краевые компоненты. Последнее упрощение свя-

зано с видом приложенной нагрузки, действующей только на данные компоненты дислокаций. За счет концентрации напряжения у вершины трещины, релаксирующего путем пластического деформирования, в этой области достигаются значительные плотности эффективных дислокаций (избыточные дислокации одного знака среди дислокаций с параллельными векторами Бюргерса) и, следовательно, возникает упругое поле, существенно влияющее на эволюцию пластической деформации.

Предположим, что пластические зоны, образующиеся в кристалле, имеют в плоскости $0xy$ линейные размеры настолько малые по сравнению с l, что правомерно описание пластической деформации у вершины полубесконечной трещины. Плоскости {110} и {112}, пересекаясь с плоскостью $0xy$, образуют на ней два семейства линий скольжения, направления которых заданы векторами ξ_k (k=1, 2).

Скорость пластического деформирования, обусловленного движением дислокаций у вершины трещины, дается формулой [20]:

$$\frac{d\varepsilon^k(r,t)}{dt} = \varepsilon_0 \exp\left[-\frac{U_0\{1-[\sigma_e^k(r,t)/\tau_0]^{1/2}\}}{k_B T_0(r,t)}\right]\text{sign}\sigma_e^k(r,t), \qquad (3)$$

где U_0 – энергия активации; k_B – постоянная Больцмана; T_0 – температура; ε_0 и τ_0 – постоянные; σ_e^k – эффективное напряжение сдвига в k-й плоскости легкого скольжения [20]

$$\sigma_e^k(r,t) = \sigma^k(r,t) - \sigma_s(r,t)\text{sign}\sigma^k(r,t) \text{ при } \left|\sigma^k(r,t)\right| > \left|\sigma_s(r,t)\right|,$$

$$\sigma_e^k(r,t) = 0 \text{ при } \left|\sigma^k(r,t)\right| < \left|\sigma_s(r,t)\right|. \qquad (4)$$

В формуле (4) сдвиговое напряжение в плоскостях легкого скольжения

$$\sigma^k(r,t) = \sigma_k^c(r,t) + \sigma_k^l(r,t), \qquad (5)$$

$$\sigma_s(r,t) = \sigma_0 + \sigma_f(r,t) \; - \qquad (6)$$

напряжение, препятствующее пластическому сдвигу за счет трения решетки σ_0 и локального упрочнения материала σ_f, вычисляемого по формуле:

$$\sigma_f = \sigma_1\left[\sum_{k=1}^{2}\left|\varepsilon(r,t)\right|\right]^m, \qquad (7)$$

где σ_1 и m – постоянные.

В формуле (5) $\sigma_k^c(r,t)$ – сдвиговая компонента тензоров напряжения (1) для k-й плоскости легкого скольжения, которую в ряде расчетов дополняли вторым членом асимптотики ($\sigma_{rr} = \sigma_r + T\cos^2\phi$, $\sigma_{\phi\phi} = \sigma_\phi + T\sin^2\phi$, $\sigma_{r\phi} = \tau_{r\phi} - T\sin\phi\cos\phi$), а также силами сцепления берегов трещины у ее вершины; $\sigma_k^l(r,t)$ – дальнодействующее упругое напряжение, создаваемое дислокациями одного знака в пластической зоне

$$\sigma_k^l(r,t) = \sum_{k=1}^{2}\int_{D_k}\tilde{\sigma}_k(z')\Delta\rho_k(z',t)dz', \qquad z' = x' + iy', \qquad (8)$$

где D_k – часть пластической зоны, образовавшейся в верхней полуплоскости в результате скольжения дислокаций вдоль ξ_k.

В формуле (8) $\Delta\rho_k(z',t)$ – плотность эффективных дислокаций, связанных с деформацией $\varepsilon^k(\vec{r},t)$ соотношением:

$$\Delta\rho_k(r,t) = -\frac{1}{b}\frac{d}{d\xi_k}\varepsilon^k(r,t), \quad (9)$$

а $\tilde{\sigma}_k(z')$ определяет напряжение, создаваемое дислокацией в упругой плоскости с полубесконечным разрезом, и задается выражением:

$$\tilde{\sigma}_k\left(r,r'\right) = \sigma'_k\left(r,r'\right) + \sigma''_k\left(r,r'\right), \quad (10)$$

где $\sigma'_k\left(r,r'\right)$ – компоненты тензора, которые характеризуют собственное поле пары дислокаций, а компоненты тензора $\sigma''_k\left(r,r'\right)$ описывают поле напряжений полубесконечной трещины-разреза, нагруженной на ее берегах усилиями, равными по величине и противоположными по знаку усилиями, создаваемыми в сплошном кристалле напряжениями $\sigma'_k\left(r,r'\right)$ на месте трещины.

Расчеты показали, что учет формы трещины не вносит существенных изменений в $\sigma_k^l(r,t)$ по сравнению с трещиной-разрезом на расстояниях, больших радиуса вершины ($r > \rho$) или размера зоны сцепления.

Уравнения (9)-(17) образуют систему, из которой при начальных

$$\varepsilon_k(r,t=0)=0\,, \qquad \sigma_a(r,t=0)=0 \quad (11)$$

и граничных условиях

$$\sigma_e^k(x \le 0, y=0, t) = 0 \quad (12)$$

определяются $\varepsilon^k(r,t), \sigma_e^k(r,t)$.

Данную систему уравнений решали численно с изменяющимся в зависимости от вычислительной ситуации шагом интегрирования Δt_i. Автоматический выбор шага по времени учитывал ограничение на максимальную скорость деформации в формуле (3) $\max\left(\dot{\varepsilon}(r,t)\right) \le 0{,}1$ с$^{-1}$. При этом ограничении остается справедливой формула (3), которая предполагает термоактивированный механизм движения дислокаций. Метод решения системы (3)-(12) аналогичен методу в работе [20]. В расчетах задавали не $\sigma_{\max}$ и $\tau_{\max}$, а соответствующее значение максимального КИН $K_{\rm I}^{\max}$ и $K_{\rm II}^{\max}$.

При расчете эволюции пластической деформации в кристалле α–Fe выбраны следующие значения постоянных: $2l = 10^{-3}$ м, $K_{\rm I}^{\max} = 0{,}2$ МПа·м$^{1/2}$, $T_0 = 300$ К; $\mu = 86{,}4$ ГПа, $\nu = 0{,}29$, $a = 2{,}867\cdot 10^{-10}$ м, $\varepsilon_0 = 10^{11}$ с$^{-1}$, $U_0 = 0{,}9$ эВ, $\tau_0 = 330$ МПа, $\sigma_0 = 18$ МПа, $\sigma_1 = 2$ ГПа, $m = 1$ [20].

На основе результатов расчетов эволюции пластической деформации далее была вычислена временная эволюция КИН. В расчете предполагалось, что для КИН трещины имеет место представление [21]:

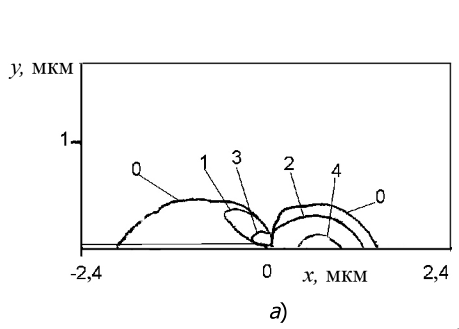
$$K_{\rm I}(t) = K_{\rm I}^V(t) + {\rm Re}\left[K^p(t)\right], \qquad K_{\rm II}(t) = K_{\rm II}^V(t) + {\rm Im}\left[K^p(t)\right]. \quad (13)$$

В формуле (13) $K_{\rm I}^V(t)$, $K_{\rm II}^V(t)$ – см. формулу (1), а $K^p(t)$ – поправка, учитывающая влияние пластической деформации на КИН:

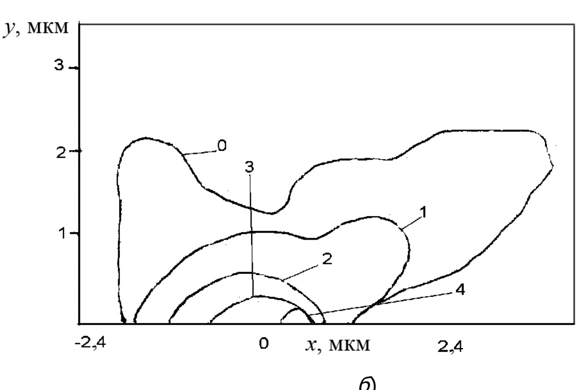
$$K^p(t) = \sum_{k=1}^{2}\int_{D_k}\tilde{K}_k^p(z')\Delta\rho_k(z',t)dz', \qquad z' = x' + iy'. \quad (14)$$

В формуле (14) $\tilde{K}_k^p$ – КИН трещины, соответствующий действию одной дислокации [21]. В некоторых расчетах выражения (13) дополняли поправкой за счет влияния области сцепления для моды I $K_\mathrm{I}(t) = K_\mathrm{I}^V(t) + \mathrm{Re}\left[K^p(t)\right] + K_\mathrm{I}^c$, где $K_\mathrm{I}^c = -\sigma_c\sqrt{\frac{8l}{\pi}}$ [15].

Результаты расчетов и их обсуждение. Проанализируем вначале результаты для модели с закругленной вершиной трещины. Ранее было получено [22], что распределения пластической деформации с учетом Т-напряжений и без них заметно различаются для всех видов ориентации плоскости скола, направления линии фронта трещины и плоскости легкого скольжения в кристалле. Влияние Т-напряжений при всех вариантах расчета приводит к укорочению времени достижения равновесного распределения пластической деформации у вершины трещины в кристалле. В работе [22] для расчета $\sigma_k^c(r,t)$ использованы компоненты тензора напряжений [см. формулу (1)] при $\rho \to 0$ в смещенных узлах $r + r_0$. В данной работе в расчетах учитывался конечный радиус вершины трещины $(\rho > 0)$ [см. формулу (1)]. Результаты расчетов показали, что форма пластической зоны и распределение пластической деформации в ней заметно зависят от радиуса вершины ρ, но основные особенности распределения пластической деформации (с учетом Т-напряжений и без них), полученные в [22], сохранились. На рис.2 показаны равновесные распределения пластической деформации у вершины трещины моды II. Для сравнения на рис.3 приведено аналогичное распределение при $\rho \to 0$. Результаты расчетов также подтвердили выводы [22] о том, что наиболее наглядное представление о влиянии Т-напряжений дают временные зависимости КИН и угла направления роста трещины.

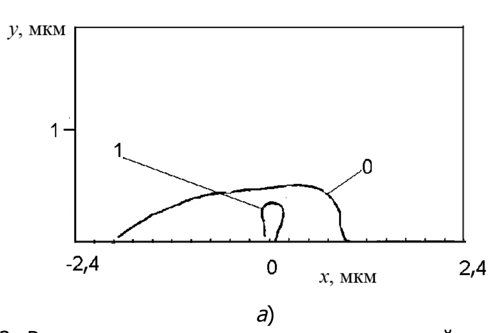


а)

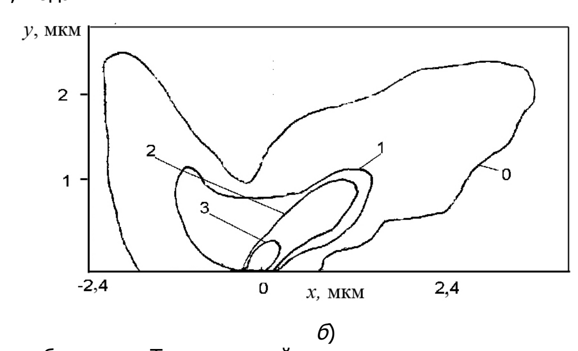


б)

Рис.2. Равновесное распределение пластической деформации без учета Т-напряжений и радиусом затупления вершины $\rho = 0{,}12$ мкм по сопряженным плоскостям скольжения. Изолинии соответствуют величине сдвиговой пластической деформации (%): *а* – ε^1 = 0 – граница пластической области; 1 – 0,036; 2 – –0,017; 3 – 0,09; 4 – –0,07; *б* – ε^2 = 0 – граница пластической области; 1 – –0,035; 2 – –0,07; 3 – –0,1; 4 – –0,17. Плоскости скольжения дислокаций {112}, плоскость трещины {100}, направление линии фронта трещины <001>, мода II



а)



б)

Рис.3. Равновесное распределение пластической деформации без учета Т-напряжений и радиусом затупления вершины $\rho = 0$ по сопряженным плоскостям скольжения. Изолинии соответствуют величине сдвиговой пластической деформации (%): *а* – ε^1=0 – граница пластической области; 1 – 0,18; *б* – ε^2=0 – граница пластической области; 1 – –0,05; 2 – –0,1; 3 – –0,2. Кристаллографические параметры те же, что и на рис.2

Исследования показали, что эти величины чувствительны также к величине радиуса вершины. Кривые 1 и 2 на рис.4 демонстрируют эффект экранирования вершины трещины для моды I.

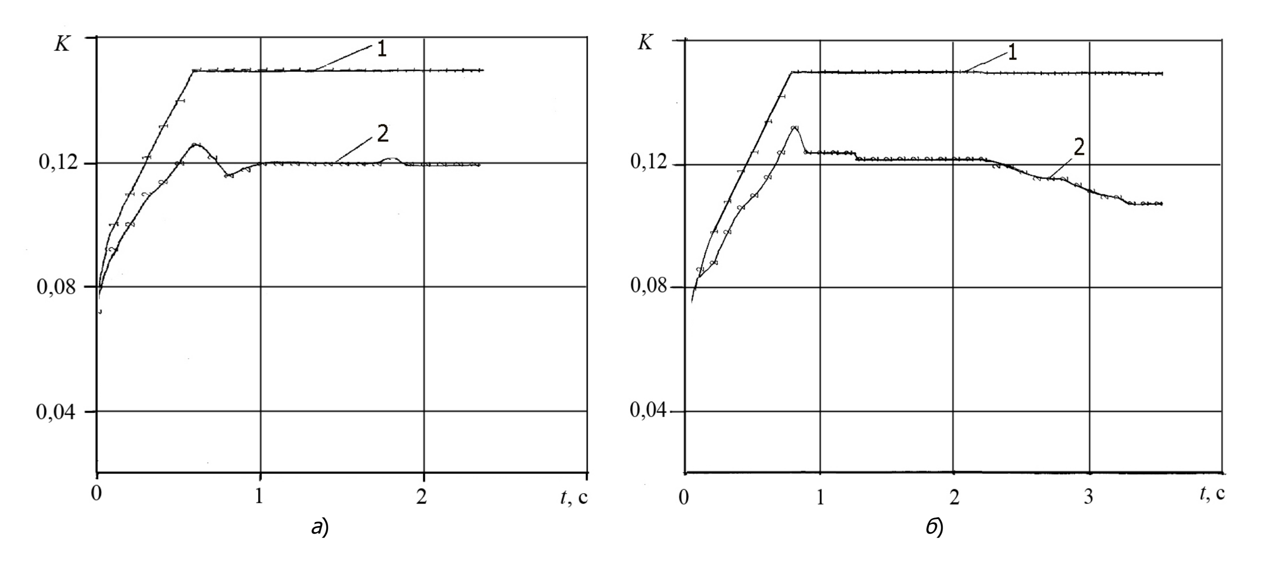


Рис.4. Временная зависимость коэффициентов интенсивности напряжения моды I без учета T-напряжений и радиусом затупления вершины: *а* – $\rho = 0,12$ мкм; *б* – $\rho = 0$. Кривые 1 и 2 определяют эволюцию $K_{\mathrm{I}}(t)$ соответственно без учета пластической деформации и с ее учетом (экранирование вершины дислокациями). Кристаллографические параметры те же, что и на рис.2

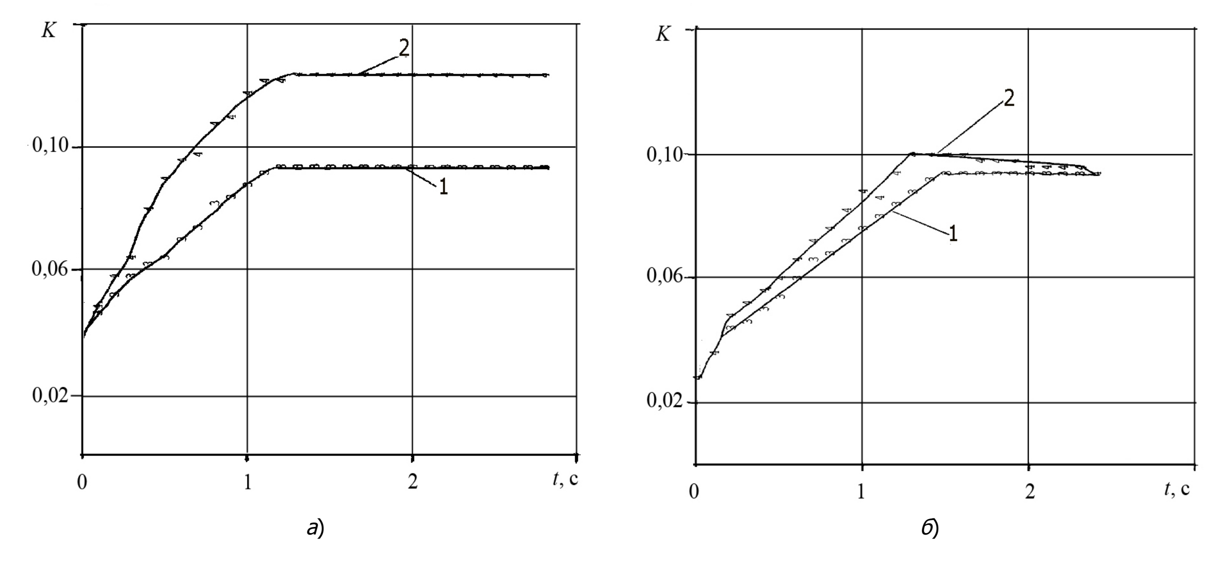


Рис.5. Временная зависимость коэффициентов интенсивности напряжения моды II без учета T-напряжений и радиусом затупления вершины: *а* – $\rho = 0,12$ мкм; *б* – $\rho = 0$. Кривые 1 и 2 определяют эволюцию $K_{\mathrm{I}}(t)$ соответственно без учета пластической деформации и с ее учетом (антиэкранирование вершины дислокациями). Кристаллографические параметры те же, что и на рис.2

Кривые 1 и 2 на рис. 5 подтверждают существование «аномальной» эволюции K_{II}, обнаруженное в [22]: при трех ориентациях плоскостей скола и линий фронта трещины при скольжении дислокаций в плоскостях легкого скольжения, образующих угол 60° с плоскостью скола, с учетом T-напряжений и без них, эволюция K_{II} с учетом пластической релаксации дает более вы-

сокие значения K_{II} по сравнению с эволюцией K_{II} для хрупкой трещины. Данное явление соответствует антиэкранированию вершины трещины.

Кроме полученных результатов расчетов, отметим, что для данной модели (мода I) трещины со сцеплением берегов вблизи вершины качественно повторяют особенности эволюции КИН за счет влияния дислокаций из пластической зоны на КИН, полученные выше. Расчеты в [15] выполнены в предположении «замороженности» дислокаций вблизи вершины, а в нашем случае происходят значительные перераспределения дислокаций у вершины трещины.

Заключение. Затупление трещины и Т-напряжение заметно влияют на равновесное распределение пластической деформации у вершины трещины и на временные зависимости коэффициентов интенсивности напряжения, а также приводят к уменьшению времени достижения равновесия. Подтверждено существование явления антиэкранирования дислокациями вершины затупленной трещины, которая соответствует большим величинам K_{II} при учете пластической релаксации по сравнению с K_{II} для хрупкой трещины. Эта «аномалия» определяется плоскостью скольжения дислокаций и не исчезает при учете Т-напряжения. Результаты расчетов, учитывающих наличие зоны сцепления, не подтверждают оценки [15], которая получена для «замороженных» дислокаций.

Библиографический список

1. Sinclair G.B. Stress singularities in classical elasticity-I: removal, interpretation and analysis / G.B. Sinclair // Applied Mechanics Review. – 2004. – Vol.57. – P.251-297.

2. Sinclair G.B. Stress singularities in classical elasticity-II: asymptotic identification / G.B. Sinclair // Applied Mechanics Review. – 2004. – Vol.57. – P.385-439.

3. Chan Y.-S. Dependence of crack singularity on loading functions / Y.-S. Chan, G.H. Paulino, B.-F. Feng, A. Sutradhar // Mechanics Research Communication. – 2010. – Vol.37. – P.191-197.

4. Fett T. T-stress and stress intensity factor solutions for 2-dimensional cracks / T. Fett. – VDI-Verlag, 2002. – 270 p.

5. Chen Y.Z. A rigorous derivation for T-stress in line crack problem / Y.Z. Chen, X.Y. Lin, Z.X. Wang // Engineering Fracture Mechanics. – 2010. – Vol.77. – P.753-757.

6. Creager M. Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking / M. Creager, P.C. Paris // Int. J. Fract. Mech. – 1967. – Vol.3. – P.247-252.

7. Kulmer G. Influence of the root radius of crack-like notches on the fracture load of brittle components / G. Kulmer, H.A. Richard // Arch. Appl. Mech. – 2006. – Vol.76. – P.711-723.

8. Li Z. The brittle fracture criterion based on the maximum tensile stress on the surface of blunt crack tip / Z. Li, C. Ji, Y. Li, L.R. Xu // Mechanics Research Communication. – 2007. – Vol.34. – P.472-479.

9. Lin I.-H. Cleavage, dislocation emission and shielding for cracks under general loading / I.-H. Lin, R. Thomson // Acta metallurgica. – 1986. – Vol.34. – P.187-206.

10. Weertman J. Dislocation based fracture mechanics / J. Weertman. – Singapore: World Scientific, 1996. – 290 p.

11. Ohr S.M. Elastic interaction of a wedge crack with a screw dislocation / S.M. Ohr, S.-J. Chang, R. Thompson // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol.57, N6. – P.1839-1843.

12. Zhang T.-Y. Interaction of an edge dislocation with a wedge crack / T.-Y. Zhang, P. Tong, H. Quyang, S. Lee // J. Appl. Phys. – 1995. – Vol.78, N8. – P.4873-4881.

13. Li T. The stress intensity factor of an edge dislocation near an elliptically blunted crack tip / T. Li, Z. Li // Int. J. Fract. – 2007. – Vol.144. – P.45-52.

14. Xie C. Cracking characteristics of mixed mode dislocations near a lip-like mode crack / C. Xie, Y.W. Liu, Q.H. Fang, M. Deng // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2009. – Vol.51. – P.139-143.

15. Bhandakkar T.K. Dislocation shielding of a cohesive crack / T.K. Bhandakkar, A.C. Chang, W.A. Curtin, H. Gao // J. Mech. Phys. Sol. – 2010. – Vol.58. – P.530-541.

16. Song J. Dislocation shielding and crack tip decohesion at the atomic scale / J. Song, W.A. Curtin, T.K. Bhandakkar, H.J. Gao // Acta Mater. – 2010. – Vol.58. – P.5933-5940.

17. Qian C.F. Micro-mechanical analysis and TEM study of crack initiation in dislocation free zone / C.F. Qian, W.Y. Chu, L.J. Qiao // Int. J. Fract. – 2002. – Vol.117. – P.313-321.

18. Qian C.F. Simulation of edge dislocation emission from a crack under in-plane shear / C.F. Qian, H.F. Li, Z.J. Jiang, D.C. Fan // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2005. – Vol.43. – P.369-375.

19. Fischer L.L. The effect of crack blunting on the competition between dislocation and cleavage / L.L. Fischer, G.E. Beltz // J. Mech. Phys. Sol. – 2001. – Vol.49. – P.635-654.

20. Карпинский Д.Н. Расчет эволюции пластической деформации у вершины трещины и связанные с ней явления / Д.Н. Карпинский, С.В. Санников // Прикладная механика и техническая физика. – 1993. – №3. – С.154-160.

21. Карпинский Д.Н. Расчет КИН с учетом пластической деформации / Д.Н. Карпинский, С.В. Санников // Письма в ЖТФ. – 1985. – Т.11, №24. – С.1481-1487.

22. Карпинский Д.Н. Влияние Т-напряжений на эволюцию пластической деформации у вершины трещины в кристалле при смешанной моде нагружения / Д.Н. Карпинский, С.В. Санников // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – №2. – С.20-24.

Материал поступил в редакцию 18.05.2011.

References

1. Sinclair G.B. Stress singularities in classical elasticity-I: removal, interpretation and analysis / G.B. Sinclair // Applied Mechanics Review. – 2004. – Vol.57. – P.251-297.

2. Sinclair G.B. Stress singularities in classical elasticity-II: asymptotic identification / G.B. Sinclair // Applied Mechanics Review. – 2004. – Vol.57. – P.385-439.

3. Chan Y.-S. Dependence of crack singularity on loading functions / Y.-S. Chan, G.H. Paulino, B.-F. Feng, A. Sutradhar // Mechanics Research Communication. – 2010. – Vol.37. – P.191-197.

4. Fett T. T-stress and stress intensity factor solutions for 2-dimensional cracks / T. Fett. – VDI-Verlag, 2002. – 270 p.

5. Chen Y.Z. A rigorous derivation for T-stress in line crack problem / Y.Z. Chen, X.Y. Lin, Z.X. Wang // Engineering Fracture Mechanics. – 2010. – Vol.77. – P.753-757.

6. Creager M. Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking / M. Creager, P.C. Paris // Int. J. Fract. Mech. – 1967. – Vol.3. – P.247-252.

7. Kulmer G. Influence of the root radius of crack-like notches on the fracture load of brittle components / G. Kulmer, H.A. Richard // Arch. Appl. Mech. – 2006. – Vol.76. – P.711-723.

8. Li Z. The brittle fracture criterion based on the maximum tensile stress on the surface of blunt crack tip / Z. Li, C. Ji, Y. Li, L.R. Xu // Mechanics Research Communication. – 2007. – Vol.34. – P.472-479.

9. Lin I.-H. Cleavage, dislocation emission and shielding for cracks under general loading / I.-H. Lin, R. Thomson // Acta metallurgica. – 1986. – Vol.34. – P.187-206.

10. Weertman J. Dislocation based fracture mechanics / J. Weertman. – Singapore: World Scientific, 1996. – 290 p.

11. Ohr S.M. Elastic interaction of a wedge crack with a screw dislocation / S.M. Ohr, S.-J. Chang, R. Thompson // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol.57, N6. – P.1839-1843.

12. Zhang T.-Y. Interaction of an edge dislocation with a wedge crack / T.-Y. Zhang, P. Tong, H. Quyang, S. Lee // J. Appl. Phys. – 1995. – Vol.78, N8. – P.4873-4881.

13. Li T. The stress intensity factor of an edge dislocation near an elliptically blunted crack tip / T. Li, Z. Li // Int. J. Fract. – 2007. – Vol.144. – P.45-52.

14. Xie C. Cracking characteristics of mixed mode dislocations near a lip-like mode crack / C. Xie, Y.W. Liu, Q.H. Fang, M. Deng // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2009. – Vol.51. – P.139-143.
15. Bhandakkar T.K. Dislocation shielding of a cohesive crack / T.K. Bhandakkar, A.C. Chang, W.A. Curtin, H. Gao // J. Mech. Phys. Sol. – 2010. – Vol.58. – P.530-541.
16. Song J. Dislocation shielding and crack tip decohesion at the atomic scale / J. Song, W.A. Curtin, T.K. Bhandakkar, H.J. Gao // Acta Mater. – 2010. – Vol.58. – P.5933-5940.
17. Qian C.F. Micro-mechanical analysis and TEM study of crack initiation in dislocation free zone / C.F. Qian, W.Y. Chu, L.J. Qiao // Int. J. Fract. – 2002. – Vol.117. – P.313-321.
18. Qian C.F. Simulation of edge dislocation emission from a crack under in-plane shear / C.F. Qian, H.F. Li, Z.J. Jiang, D.C. Fan // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2005. – Vol.43. – P.369-375.
19. Fischer L.L. The effect of crack blunting on the competition between dislocation and cleavage / L.L. Fischer, G.E. Beltz // J. Mech. Phys. Sol. – 2001. – Vol.49. – P.635-654.
20. Karpinskij D.N. Raschyot e`volyucii plasticheskoj deformacii u vershiny` treshhiny` i svyazanny`e s nej yavleniya / D.N. Karpinskij, S.V. Sannikov // Prikladnaya mexanika i texnicheskaya fizika. – 1993. – #3. – S.154-160. – In Russian.
21. Karpinskij D.N. Raschyot KIN s uchyotom plasticheskoj deformacii / D.N. Karpinskij, S.V. Sannikov // Pis`ma v ZHTF. – 1985. – T.11, #24. – S.1481-1487. – In Russian.
22. Karpinskij D.N. Vliyanie T-napryazhenij na e`volyuciyu plasticheskoj deformacii u vershiny` treshhiny` v kristalle pri smeshannoj mode nagruzheniya / D.N. Karpinskij, S.V. Sannikov // Deformaciya i razrushenie materialov. – 2009. – #2. – S.20-24. – In Russian.

PLASTIC DEFORMATION EVOLUTION AT BLUNT CRACK TIP IN CRYSTAL

D.N. KARPINSKIY, S.V. SANNIKOV
(Southern Federal University),
B.V. SOBOL
(Don State Technical University)

The plastic deformation evolution at the crack tip in α-Fe crystal under the condition of the plane deformation (modes I, II) is calculated. Temporal distributions for the plastic deformation, effective shear stress, stress intensity factor are derived. The calculation results for the blunt and acute crack tips are compared.
Keywords: *crack tip, plastic deformation, crystal, dislocations, cleavage faces, easy slip systems, stress intensity factor.*

УДК 539.3

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ

О.Г. ОСЯЕВ, Ю.А. ТАТУРИН, А.М. КОСТИН, А.В. ЖУКОВ
(Ростовский военный институт ракетных войск)

Предложена математическая модель для анализа сложного напряженно-деформированного состояния многослойных несущих конструкций летательных аппаратов, представленная в виде системы уравнений связи параметров нагружения, напряжений и деформаций. Для решения системы уравнений использован комплексный многоуровневый метод решения, позволяющий учесть особенности геометрии конструкции и поведения конструкционных материалов в процессе многофакторного нагружения.
Ключевые слова: *длительная прочность, напряженно-деформированное состояние, ползучесть.*

Введение. На этапах эксплуатации конструкции летательных аппаратов испытывают комплексное воздействие факторов термосилового нагружения. Особенность механического поведения конструкционных полимерных композитных материалов состоит в том, что при нормальной температуре эксплуатации и сравнительно небольших уровнях напряжений они проявляют свойство ползучести. Поэтому при выполнении прочностных расчетов необходимо учитывать их указанные особенности.

Установлено [1], что закономерности ползучести основных конструкционных полимерных материалов в широком диапазоне напряжений удовлетворительно описываются линейными наследственными уравнениями. В общем случае пространственного теплового и напряженно-деформированного состояния краевая задача линейной наследственной теории ползучести сводится к решению уравнений наследственной термовязкоупругости.

Определение напряженно-деформированного состояния конструкций из полимерных композитов при многофакторном нагружении. На основании принципа соответствия решение задачи наследственной ползучести может быть приведено к решению соответствующей задачи упругости путем замены основных констант вязкоупругости материала соответствующими временными операторами с помощью прямого символического метода Вольтерра, либо применением преобразования Лапласа или Лапласа – Карсона к наследственным интегралам ползучести. Для этой же цели могут быть использованы методы преобразования Фурье или разложения в ряды других видов. Выбор метода зависит от физической модели рассматриваемых процессов и свойств материала конструкций.

Обозначим параметры пространственного теплового и напряженно-деформированного состояния (НДС), к которым применены указанные виды преобразований, верхним индексом «*», а временные операторы вязкоупругости, замещающие соответствующие константы вязкоупругости материалов, – верхней чертой. Представим воздействие внешних статических, динамических сил и тепловых источников в виде вектора полей температур $T^{\pm}$, тепловых потоков $q^{\pm}$, напряжений $\sigma^{\pm}$ и перемещений $u^{\pm}$ на внутренней и наружной поверхностях оболочки корпуса несущей конструкции летательного аппарата:

$$\sigma^{\pm} = \left\{ T^{\pm}, q^{\pm}, \sigma_{13}^{\pm}, \sigma_{23}^{\pm}, \sigma_{33}^{\pm}, u_1^{\pm}, u_2^{\pm}, u_3^{\pm} \right\}. \quad (1)$$

Рассмотрим многослойную оболочку корпуса несущей конструкции летательного аппарата из вязкоупругих анизотропных материалов, отнесенную к криволинейной ортогональной системе координат x_1, x_2, x_3. Здесь, наряду с общей системой координат x_1, x_2, x_3, введена также и ло-

кальная система $x_{1,k}, x_{2,k}, x_{3,k}$, связанная с каждым слоем k. При этом каждая из поверхностей слоя k $x_{3,k} = 0$ совпадает с его срединной поверхностью радиусом $R_k^{\text{ср}}$. Для каждого слоя k многослойной оболочки справедлива система уравнений, которая получается на основе классической системы нелинейных уравнений теории упругости [2] в предположении геометрической линейности деформаций ε_{ij} относительно перемещений u_{ij} и физической нелинейности материала, обусловленной реологическими свойствами полимерных композитов. С учетом рассмотренных преобразований, исходную систему уравнений представим в тензорном виде:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + X_i = 0, \quad \sigma_{ij} = \bar{E} e_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \quad i, j = 1,\ 2,\ 3, \tag{2}$$

где X_i – вектор объемных сил; $\bar{E}$ – операторный модуль вязкоупругости; e_{ij} – деформация.

Для перехода от уравнений равновесия к уравнениям движения компоненты вектора объемных сил представим выражением:

$$\bar{X}_i = X_i - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t_2}, \qquad i = 1,\ 2,\ 3. \tag{3}$$

Применяя преобразование Лапласа к уравнению (3) и принимая параметр преобразования $p = \lambda$, где λ – эмпирическая константа материала,

при начальных условиях

$$u = u \Big|_{t=0}, \qquad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t}\Big|_{t=0} \tag{4}$$

получаем:

$$\bar{X}_i^* = X_i^* - \rho\left(\lambda^2 u^* - \lambda u \Big|_{t=0} - \frac{\partial u}{\partial t}\Big|_{t=0}\right), \quad i = 1,\ 2,\ 3. \tag{5}$$

Учитывая особенности геометрии формы конструкций оболочек с использованием коэффициентов Ламе H_1, H_2, H_3, исходную систему уравнений, справедливую для каждого слоя k многослойной оболочки, с учетом выражений (3)-(5), запишем в следующем виде:

– уравнения движения

$$\begin{gathered}
\frac{\partial}{\partial x_1}(H_2\sigma_{11}^*) - \frac{\partial H_2}{\partial x_1}\sigma_{22}^* + \frac{\partial}{\partial x_2}(H_1\sigma_{12}^*) + \frac{\partial H_1}{\partial x_2}\sigma_{12}^* + \frac{\partial}{\partial x_3}(H_1 H_2 \sigma_{13}^*) + \\
+ H_2 \frac{\partial H_1}{\partial x_3}\sigma_{13}^* + X_1^* - \rho\left(\lambda^2 u_1^* - \lambda u_1 \Big|_{t=0} - \frac{\partial u_1}{\partial t}\Big|_{t=0}\right) = 0, \\
\frac{\partial}{\partial x_2}(H_1\sigma_{22}^*) - \frac{\partial H_1}{\partial x_2}\sigma_{11}^* + \frac{\partial}{\partial x_1}(H_2\sigma_{12}^*) + \frac{\partial H_2}{\partial x_1}\sigma_{12}^* + \frac{\partial}{\partial x_3}(H_1 H_2 \sigma_{23}^*) + \\
+ H_1 \frac{\partial H_2}{\partial x_3}\sigma_{23}^* + X_2^* - \rho\left(\lambda^2 u_2^* - \lambda u_2 \Big|_{t=0} - \frac{\partial u_2}{\partial t}\Big|_{t=0}\right) = 0, \\
\frac{\partial}{\partial x_1}(H_2\sigma_{11}^*) - H_1\frac{\partial H_2}{\partial x_3}\sigma_{22}^* + \frac{\partial}{\partial x_2}(H_1\sigma_{23}^*) + \frac{\partial}{\partial x_3}(H_1 H_2 \sigma_{33}^*) - \\
- H_2 \frac{\partial H_1}{\partial x_3}\sigma_{11}^* + X_3^* - \rho\left(\lambda^2 u_3^* - \lambda u_3 \Big|_{t=0} - \frac{\partial u_3}{\partial t}\Big|_{t=0}\right) = 0;
\end{gathered} \tag{6}$$

– физические уравнения связи напряжений и деформаций

$$\varepsilon_{11}^* = \frac{1}{\overline{E}_{11}}\sigma_{11}^* - \frac{\nu_{12}}{\overline{E}_{22}}\sigma_{22}^* - \frac{\nu_{13}}{\overline{E}_{33}}\sigma_{33}^*, \qquad \varepsilon_{12}^* = \frac{1}{\overline{G}_{12}}\sigma_{12}^*,$$
$$\varepsilon_{22}^* = \frac{1}{\overline{E}_{22}}\sigma_{22}^* - \frac{\nu_{12}}{\overline{E}_{22}}\sigma_{11}^* - \frac{\nu_{23}}{\overline{E}_{33}}\sigma_{33}^*, \qquad \varepsilon_{13}^* = \frac{1}{\overline{G}_{13}}\sigma_{13}^*, \tag{7}$$
$$\varepsilon_{33}^* = \frac{1}{\overline{E}_{33}}\sigma_{33}^* - \frac{\nu_{13}}{\overline{E}_{33}}\sigma_{11}^* - \frac{\nu_{23}}{\overline{E}_{33}}\sigma_{22}^*, \qquad \varepsilon_{23}^* = \frac{1}{\overline{G}_{23}}\sigma_{23}^*.$$

Здесь характеристики материала $\overline{E}$ и $\overline{G}$ представляют операторные модули вязкоупругости и вязкого сдвига соответственно, ν – коэффициент Пуассона;

– геометрические уравнения Коши

$$\varepsilon_{11}^* = \frac{1}{H_1}\frac{\partial u_1^*}{\partial x_1} + \frac{1}{H_1H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}u_2^* + \frac{1}{H_1H_3}\frac{\partial H_1}{\partial x_3}u_3^*,$$
$$\varepsilon_{22}^* = \frac{1}{H_2}\frac{\partial u_2^*}{\partial x_2} + \frac{1}{H_2H_3}\frac{\partial H_2}{\partial x_3}u_3^* + \frac{1}{H_2H_1}\frac{\partial H_2}{\partial x_1}u_1^*,$$
$$\varepsilon_{33}^* = \frac{1}{H_3}\frac{\partial u_3^*}{\partial x_3} + \frac{1}{H_1H_3}\frac{\partial H_3}{\partial x_1}u_1^* + \frac{1}{H_2H_3}\frac{\partial H_3}{\partial x_2}u_2^*, \tag{8}$$
$$\varepsilon_{12}^* = \frac{1}{H_2}\frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} + \frac{1}{H_1}\frac{\partial u_2^*}{\partial x_1},$$
$$\varepsilon_{13}^* = \frac{1}{H_3}\frac{\partial u_1^*}{\partial x_3} + \frac{1}{H_1}\frac{\partial u_3^*}{\partial x_1},$$
$$\varepsilon_{23}^* = \frac{1}{H_3}\frac{\partial u_2^*}{\partial x_3} + \frac{1}{H_2}\frac{\partial u_3^*}{\partial x_2};$$

– начальные условия

$$\overline{\sigma}^* = \overline{\sigma}^*\Big|_{t=0}, \quad \left(\frac{\partial\overline{\sigma}}{\partial t}\right)^* = \left[\left(\frac{\partial\overline{\sigma}}{\partial t}\right)\Big|_{t=0}\right]^* = \rho\overline{\sigma}^* - \overline{\sigma}\Big|_{t=0}; \tag{9}$$

– граничные условия

на наружной и внутренней поверхностях пакета слоев:

$$\sigma_{13,1}^* = (\sigma_{13,1}^+)^*, \quad \sigma_{23,1}^* = (\sigma_{23,1}^+)^*, \quad \sigma_{33,1}^* = (\sigma_{33,1}^+)^*,$$
$$\sigma_{13,k}^* = (\sigma_{13,k}^-)^*, \quad \sigma_{23,k}^* = (\sigma_{23,k}^-)^*, \quad \sigma_{33,k}^* = (\sigma_{33,k}^-)^*; \tag{10}$$

поверхностях контакта смежных слоев:

$$u_{i,k}^* = u_{i,k+1}^*, \quad \sigma_{33,k}^* = \sigma_{33,k+1}^*,$$
$$\sigma_{ij,k}^* = \sigma_{ij,k+1}^*, \; i,j = 1,\ 2,\ 3, \; k = 1,\ 2,\ ...,\ K; \tag{11}$$

боковых поверхностях смежных слоев:

$$\sigma_{11,k}^*(1+e_{11,k}^*) + \sigma_{12,k}^*\left(\frac{1}{2}e_{12,k}^* - \vartheta_{33,k}^*\right) = \hat{\sigma}_{11,k},$$
$$\sigma_{11,k}^*\left(\frac{1}{2}e_{12,k}^* + \vartheta_{33,k}^*\right) + \sigma_{12,k}^*(1+e_{22,k}^*) = \hat{\sigma}_{12,k}, \tag{12}$$
$$\sigma_{11,k}^*\left(\frac{1}{2}e_{13,k}^* - \vartheta_{22,k}^*\right) + \sigma_{12,k}^*\left(\frac{1}{2}e_{23,k}^* + \vartheta_{11,k}^*\right) + \sigma_{13,k}^* = \hat{\sigma}_{13,k},$$
$$\sigma_{22,k}^*\left(\frac{1}{2}e_{23,k}^* - \vartheta_{11,k}^*\right) + \sigma_{12,k}^*\left(\frac{1}{2}e_{13,k}^* + \vartheta_{22,k}^*\right) + \sigma_{23,k}^* = \hat{\sigma}_{23,k}.$$

Для решения системы уравнений (6)-(12) выберем в качестве неизвестных функции, с помощью которых выражаются условия контакта между слоями.

Компоненты тензоров деформаций, а также слагаемые, содержащие величины углов поворота в уравнениях (12), определяются с помощью известных соотношений нелинейной теории упругости [2]. Решая систему (6)-(8) относительно этих функций, получаем для ортотропной цилиндрической оболочки следующую разрешающую систему уравнений:

$$\frac{\partial\sigma_{13}^*}{\partial x_3} = -\frac{1}{x_3}\sigma_{13}^* - A_{1,11}^*\frac{\partial\sigma_{33}^*}{\partial x_1} - \frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x_1^2}\left(\Delta_{1,11}^* + \sigma_{11,0}\right) - \frac{1}{x_3^2}\frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x_2^2}\left(\Delta_{3,12}^* + \sigma_{22,0}\right) -$$
$$- \frac{1}{x_3}\frac{\partial^2 u_2^*}{\partial x_1 \partial x_2}\left(\Delta_{2,11}^* - \Delta_{3,12}^*\right) - \frac{1}{x_3}\Delta_{2,11}^*\frac{\partial u_3^*}{\partial x_1} - A_{2,11}^*\frac{\partial T}{\partial x_1} - X_1^* +$$
$$+\rho\left(\lambda^2 u_1^* - \lambda u_1\Big|_{t=0} - \frac{\partial u_1}{\partial t}\Big|_{t=0}\right),$$

$$\frac{\partial\sigma_{23}^*}{\partial x_3} = -\frac{2}{x_3}\sigma_{23}^* - \frac{1}{x_3}A_{1,22}^*\frac{\partial\sigma_{33}^*}{\partial x_2} - \frac{1}{x_3}\frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x_1 \partial x_2}\left(\Delta_{1,22}^* + \Delta_{3,12}^*\right) -$$
$$- \frac{\partial^2 u_2^*}{\partial x_1^2}\left(\Delta_{3,12}^* + \sigma_{11,0}\right) - \frac{1}{x_3^2}\frac{\partial^2 u_2^*}{\partial x_2^2}\left(\Delta_{2,22}^* + \sigma_{22,0}\right) + \frac{1}{x_3^2}\sigma_{22,0}u_2^* -$$
$$- \frac{1}{x_3^2}\frac{\partial u_3^*}{\partial x_2}\left(\Delta_{2,22}^* + 2\sigma_{22,0}\right) - \frac{1}{x_3}A_{2,22}^*\frac{\partial T}{\partial x_2} - X_2^* +$$
$$+\rho\left(\lambda^2 u_2^* - \lambda u_2\Big|_{t=0} - \frac{\partial u_2}{\partial t}\Big|_{t=0}\right), \qquad (13)$$

$$\frac{\partial\sigma_{33}^*}{\partial x_3} = -\frac{\partial\sigma_{13}^*}{\partial x_1} - \frac{1}{x_3}\left(\frac{\partial\sigma_{23}^*}{\partial x_2} + \sigma_{33}^* - A_{1,22}^*\sigma_{33}^* - \Delta_{1,22}^*\frac{\partial u_1^*}{x_1} - A_{2,22}^* T\right) +$$
$$+ \frac{1}{x_3^2}\frac{\partial u_2^*}{\partial x_2}\left(\Delta_{2,22}^* + \sigma_{22,0} + \Delta_{2,22}^* u_3^*\right) - \sigma_{11,0}\frac{\partial^2 u_3^*}{\partial x_1^2} - \frac{1}{x_3^2}\sigma_{22,0}\frac{\partial^2 u_3^*}{\partial x_2^2} - X_3^* +$$
$$+\rho\left(\lambda^2 u_3^* - \lambda u_3\Big|_{t=0} - \frac{\partial u_3}{\partial t}\Big|_{t=0}\right),$$

$$\frac{\partial u_1^*}{\partial x_3} = a_{55}^*\sigma_{13}^* - \frac{\partial u_3^*}{\partial x_1}, \qquad \frac{\partial u_2^*}{\partial x_3} = a_{44}^*\sigma_{23}^* + \frac{1}{x_3}\left(u_2^* - \frac{\partial u_3^*}{\partial x_2}\right),$$
$$\frac{\partial u_3^*}{\partial x_3} = m_{1,33}^*\sigma_{33}^* + n_{1,33}^*\frac{\partial u_1^*}{\partial x_1} + \frac{1}{x_3}n_{2,33}^*\left(u_3^* + \frac{\partial u_2^*}{\partial x_2}\right) + m_{2,33}^* T.$$

Напряжения σ_{11}^*, σ_{12}^*, σ_{23}^* определяются с помощью физических и геометрических уравнений (7), (8):

$$\sigma_{11}^* = \Delta_{1,11}^*\frac{\partial u_1^*}{\partial x_1} + \frac{1}{x_3}\Delta_{2,11}^*\left(u_3^* + \frac{\partial u_2^*}{\partial x_2}\right) - \sigma_{33}^*\left(a_{13}^*\Delta_{1,11}^* + a_{23}^*\Delta_{2,11}^*\right) + A_{2,11}^* T,$$
$$\sigma_{12}^* = \Delta_{3,12}^*\left(\frac{1}{x_3}\frac{\partial u_1^*}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2^*}{\partial x_1}\right), \qquad (14)$$
$$\sigma_{22}^* = \Delta_{1,22}^*\frac{\partial u_1^*}{\partial x_1} + \frac{1}{x_3}\Delta_{2,22}^*\left(u_3^* + \frac{\partial u_2^*}{\partial x_2}\right) - \sigma_{33}^*\left(a_{13}^*\Delta_{1,22}^* + a_{23}^*\Delta_{2,22}^*\right) + A_{2,22}^* T.$$

Коэффициенты в уравнениях (13) и (14) определяются следующими соотношениями между физико-механическими и теплофизическими параметрами слоев оболочки корпуса летательного аппарата:

$$\Delta_{1,11}^* = \frac{a_{22}^* a_{66}^*}{\Delta^*};\ \Delta_{2,11}^* = \frac{a_{12}^* a_{66}^*}{\Delta^*};\ \Delta_{1,22}^* = \frac{a_{12}^* a_{66}^*}{\Delta^*};\ \Delta_{2,22}^* = \frac{a_{11}^* a_{66}^*}{\Delta^*};\ \Delta_{3,12}^* = \frac{a_{11}^* a_{22}^* - (a_{12}^2)^*}{\Delta^*};$$

$$\Delta^* = a_{66}^*\left[a_{11}^* - (a_{22}^*)^*\right];\ A_{1,11}^* = -a_{13}^*\Delta_{1,11}^* - a_{23}^*\Delta_{2,11}^*;\ A_{1,22}^* = -a_{13}^*\Delta_{1,22}^* - a_{23}^*\Delta_{2,22}^*;\ A_{2,11}^* = -\alpha_{11}\Delta_{1,11}^* - \alpha_{22}\Delta_{2,11}^*;$$

$$A_{2,22}^* = -\alpha_{11}\Delta_{1,22}^* - \alpha_{22}\Delta_{2,22}^*;\ n_{1,33}^* = a_{13}^*\Delta_{1,11}^* + a_{23}^*\Delta_{1,22}^*;\ n_{2,33}^* = a_{13}^*\Delta_{2,11}^* + a_{23}^*\Delta_{2,22}^*; \quad (15)$$

$$m_{1,33}^* = -a_{13}^* n_{1,33}^* - a_{23}^*\Delta_{2,33}^* + a_{33}^*;\quad m_{2,33}^* = -\alpha_{11} n_{1,33}^* - \alpha_{22} n_{2,33}^* + \alpha_{33};$$

$$a_{11}^* = \frac{1}{\bar{E}_{11}};\quad a_{22}^* = \frac{1}{\bar{E}_{22}};\quad a_{33}^* = \frac{1}{\bar{E}_{33}};\quad a_{12}^* = -\frac{\nu_{12}}{\bar{E}_{22}};\quad a_{13}^* = -\frac{\nu_{13}}{\bar{E}_{33}};\quad a_{23}^* = -\frac{\nu_{23}}{\bar{E}_{33}};$$

$$a_{44}^* = \frac{1}{\bar{G}_{23}};\quad a_{55}^* = \frac{1}{\bar{G}_{13}};\quad a_{66}^* = \frac{1}{\bar{G}_{12}}.$$

Представим неизвестные функции $\bar{\sigma}^*$, а также параметры нагрузки $\bar{\sigma}^{\pm}$ в виде двойных тригонометрических рядов:

$$\left\{u_1^*, \sigma_{13}^*, \sigma_{13}^{\pm}\right\} = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{u_{1,mn}^*, \sigma_{13,mn}^*, \sigma_{13,mn}^{\pm}\right\}\cos\frac{m\pi}{l}x_1\cos nx_2,$$

$$\left\{u_2^*, \sigma_{23}^*, \sigma_{23}^{\pm}\right\} = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{u_{2,mn}^*, \sigma_{23,mn}^*, \sigma_{23,mn}^{\pm}\right\}\sin\frac{m\pi}{l}x_1\sin nx_2, \quad (16)$$

$$\left\{u_3^*, \sigma_{33}^*, \sigma_{33}^{\pm}\right\} = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{u_{3,mn}^*, \sigma_{33,mn}^*, \sigma_{33,mn}^{\pm}\right\}\sin\frac{m\pi}{l}x_1\cos nx_2;$$

$$\sigma_{13,mn}^{\pm} = \int_0^l\int_0^{2\pi}\sigma_{13}^{\pm}\cos\frac{m\pi}{l}x_1\cos nx_2\,dx_1 dx_2,$$

$$\sigma_{23,mn}^{\pm} = \int_0^l\int_0^{2\pi}\sigma_{23}^{\pm}\sin\frac{m\pi}{l}x_1\sin nx_2\,dx_1 dx_2, \quad (17)$$

$$\sigma_{33,mn}^{\pm} = \int_0^l\int_0^{2\pi}\sigma_{33}^{\pm}\sin\frac{m\pi}{l}x_1\cos nx_2\,dx_1 dx_2.$$

Производные по времени разложим в конечные разности с шагом Δt:

$$\frac{\partial^2\bar{\sigma}^*}{\partial t^2} = \frac{2\bar{\sigma}^*(t_s) - 5\bar{\sigma}^*(t_{s-1}) + 4\bar{\sigma}^*(t_{s-2}) - \bar{\sigma}^*(t_{s-3})}{\Delta t^2},$$

$$\frac{\partial\bar{\sigma}^*}{\partial t} = \frac{3\bar{\sigma}^*(t_s) - 4\bar{\sigma}^*(t_{s-1}) + \bar{\sigma}^*(t_{s-2})}{2\Delta t}. \quad (18)$$

Подставим разложенные в ряды (16) и конечные разности (18) искомые функции $\bar{\sigma}^*$ в разрешающую систему уравнений (13). Получим систему обыкновенных дифференциальных

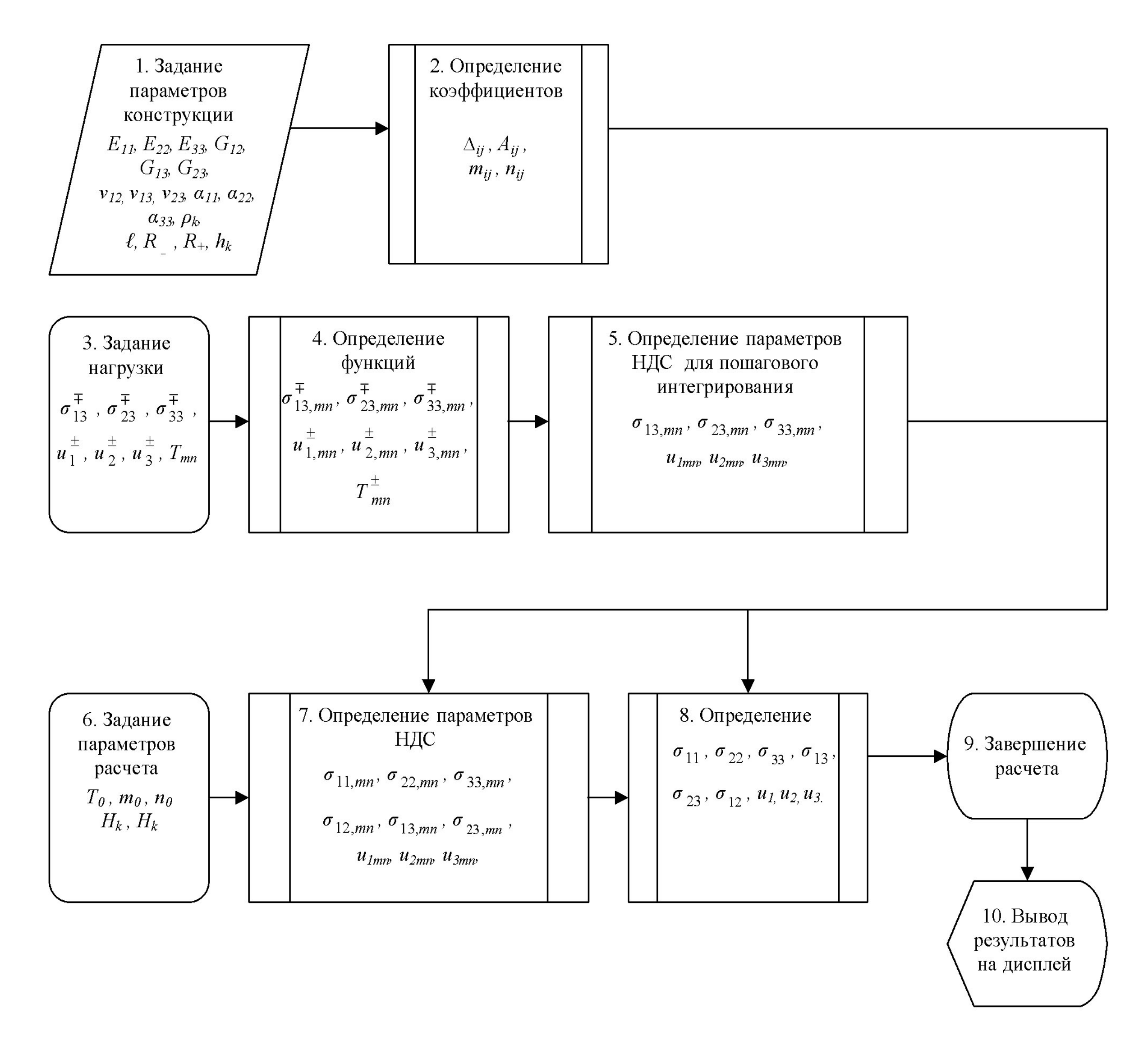
уравнений для каждого временного шага t_s и каждой пары волновых чисел m и n разложения в двойные ряды Фурье соответственно по продольной x_1 и окружной x_2 координатам:

$$\begin{gathered}
\frac{\partial\sigma_{13}^*(t_s)}{\partial x_3} = -\frac{\sigma_{13}^*(t_s)}{x_3} - A_{1,11}^*\tilde{\lambda}_m\sigma_{33}^*(t_s) + u_1^*(t_s)\Big(\Delta_{1,11}^*\tilde{\lambda}_m^2 + \frac{n^2}{x_3^2}\Delta_{3,12}^* + \sigma_{11,0}\tilde{\lambda}_m^2 + \\
+\frac{n^2}{x_3^2}\sigma_{22,0}\Big) - \frac{n}{x_3}\tilde{\lambda}_m u_2^*(t_s)\Big(\Delta_{2,11}^* + \Delta_{3,12}^*\Big) - \frac{1}{x_3}\tilde{\lambda}_m u_3^*(t_s)\Delta_{2,11}^* - A_{2,11}^*\tilde{\lambda}_m T(t_s) - \\
-X_1^*(t_s) + \frac{\rho}{\Delta t^2}\big[2u_1^*(t_s) - 5u_1^*(t_{s-1}) + 4u_1^*(t_{s-2}) - u_1^*(t_{s-3})\big];\\
\frac{\partial\sigma_{23}^*(t_s)}{\partial x_3} = -\frac{2\sigma_{23}^*(t_s)}{x_3} + \frac{n}{x_3}A_{1,22}^*\sigma_{33}^*(t_s) - \frac{n}{x_3}\tilde{\lambda}_m u_1^*(t_s)\Big(\Delta_{1,22}^* + \Delta_{3,12}^*\Big) + \\
+u_2^*(t_s)\Big(\Delta_{3,12}^*\tilde{\lambda}_m^2 + \frac{n^2}{x_3^2}\Delta_{2,22}^* + \sigma_{11,0}\tilde{\lambda}_m^2 + \frac{n^2}{x_3^2}\sigma_{22,0} + \frac{1}{x_3^2}\sigma_{22,0}\Big) + \\
+\frac{n}{x_3^2}\omega(t_s)\Big(\Delta_{2,22}^* + 2\sigma_{22,0}\Big) + \frac{n}{x_3}A_{2,22}^*T(t_s) - \qquad (19)\\
-X_2^*(t_s) + \frac{\rho}{\Delta t^2}\big[2u_2^*(t_s) - 5u_2^*(t_{s-1}) + 4u_2^*(t_{s-2}) - u_2^*(t_{s-3})\big];\\
\frac{\partial\sigma_{33}^*(t_s)}{\partial x_3} = \tilde{\lambda}_m\sigma_{13}^*(t_s) - \frac{\sigma_{23}^*(t_s)}{x_3}n + \frac{\sigma_{33}^*(t_s)}{x_3}(A_{1,22}^* - 1) - \frac{\Delta_{1,22}^*}{x_3}\tilde{\lambda}_m u_1^*(t_s) + \\
+\frac{n}{x_3^2}u_2^*(t_s)\Big(\Delta_{2,22}^* + \sigma_{22,0}\Big) + u_3^*(t_s)\left(\frac{1}{x_3^2}\Delta_{2,22}^* + \sigma_{11,0}\tilde{\lambda}_m^2 + \frac{1}{x_3^2}\sigma_{22,0}n^2\right) + \frac{T(t_s)}{x_3}A_{2,22}^* - \\
-X_3^*(t_s) + \frac{\rho}{\Delta t^2}\big[2u_3^*(t_s) - 5u_3^*(t_{s-1}) + 4u_3^*(t_{s-2}) - u_3^*(t_{s-3})\big];\\
\frac{\partial u_1^*(t_s)}{\partial x_3} = a_{55}^*\sigma_{13}^*(t_s) - \tilde{\lambda}_m u_3^*(t_s);\quad \frac{\partial u_2^*(t_s)}{\partial x_3} = a_{44}^*\sigma_{23}^*(t_s) + \frac{1}{x_3}u_2^*(t_s) + \frac{n}{x_3}u_3^*(t_s);\\
\frac{\partial u_3^*(t_s)}{\partial x_3} = m_{1,33}^*\sigma_{33}^*(t_s) - n_{1,33}^*\tilde{\lambda}_m u_1^*(t_s) + \frac{n}{x_3}n_{2,33}^*u_2^*(t_s) + \frac{1}{x_3}n_{2,33}^*u_2^*(t_s) + m_{2,33}^*T(t_s).
\end{gathered}$$

Решение системы уравнений (19) осуществляется численным методом дискретной ортогонализации [3], который позволяет автоматически удовлетворять граничным условиям контакта слоев оболочки. Статическое напряженно-деформированное состояние оболочки, обусловленное постоянными или медленно изменяющимися нагрузками в процессе эксплуатации, определяется с помощью методов расчета наследственной ползучести [1]. При воздействии динамических нагрузок на рассматриваемую оболочку корпуса, полученные значения $\sigma_{11,0}$ и $\sigma_{22,0}$, характеризующие предыдущее статическое состояние конструкции, используются в качестве параметров предварительного нагружения в уравнениях (19). Результатом решения системы уравнений (19) являются функции $\bar{\sigma}_{i3,mn}^*$. Искомые функции $\bar{\sigma}_{i3}^*$ определяют с помощью выражений (16) путем двойного суммирования $\bar{\sigma}_{i3,mn}^*$. Оставшиеся искомые напряжения σ_{11}^*, σ_{12}^*, σ_{23}^* находят также путем двойного суммирования результатов разложения этих функций, определяемых уравнениями (14), аналогично уравнениям (16):

$$\begin{gathered}
\sigma_{11}^* = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left[A_{1,11}^*\sigma_{33,mn}^* + \frac{\Delta_{2,11}^*}{x_3}\Big(u_{2,mn}^*n + u_{3,mn}^*\Big) - \Delta_{1,11}^*\tilde{\lambda}_m u_{1,mn}^*\right]\sin\tilde{\lambda}_m x_1\cos nx_2,\\
\sigma_{12}^* = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left(u_{2,mn}^*\tilde{\lambda}_m - \frac{1}{x_3}u_{1,mn}^*n\right)\cos\tilde{\lambda}_m x_1\sin nx_2, \qquad (20)\\
\sigma_{22}^* = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\left[A_{1,22}^*\sigma_{33,mn}^* + \frac{\Delta_{2,22}^*}{x_3}\Big(u_{2,mn}^*n + u_{3,mn}^*\Big) - \Delta_{1,22}^*\tilde{\lambda}_m u_{1,mn}^*\right]\sin\tilde{\lambda}_m x_1\cos nx_2.
\end{gathered}$$

Блок-схема алгоритма решения задачи приведена на рисунке. На первом шаге осуществляется ввод данных о массово-геометрических, физико-механических, теплофизических и деформационных характеристиках материалов и конструкции корпуса летательного аппарата. На втором шаге определяются коэффициенты, учитывающие данные свойства материалов и конструкции, с помощью соотношений (15). Одновременно на шаге 3 выполняется операция задания нагрузки, действующей на конструкцию, выраженной через наружные и внутренние напряжения, перемещения и температуру. Заданные составляющие функций параметров нагружения используются для определения коэффициентов пошагового разложения нагрузки по волновым числам m и n в меридиональном и окружном направлениях соответственно. Для этого используются двойные интегральные выражения для коэффициентов анализа Фурье (17). Далее, на шаге 5 с помощью выражений (16) определяются функции разложения нагрузки и параметров напряженно-деформированного состояния в двойные тригонометрические ряды.



Блок-схема решения задачи

На шестом шаге алгоритма задаются параметры численного интегрирования (начальные значения температуры, волновые числа, число шагов интегрирования по толщине каждого слоя и число точек дискретной ортогонализации). На шаге 7 выполняется решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (19). На шаге 8 определяются искомые полные функции напряжений и перемещений путем двойного суммирования волновых функций (20). Для решения уравнений (19) и (20) используются результаты, полученные на шагах 2, 5 и 6 алгоритма, как показано на блок-схеме (см. рисунок).

Системы уравнений (6)-(20) и рассмотренные методы их решения могут быть использованы для решения физически нелинейных задач термоупругости и термовязкоупругости при многофакторном статическом и динамическом нагружении многослойных оболочек сложных несущих конструкций летательных аппаратов из полимерных композитов в условиях эксплуатации.

Заключение. Представлена математическая модель для анализа сложного напряженно-деформированного состояния многослойных несущих конструкций летательных аппаратов. Решение системы уравнений осуществлено комплексным многоуровневым методом, позволяющим учесть особенности геометрии конструкции и поведения конструкционных материалов при многофакторном нагружении.

Библиографический список

1. Гольденблат И.И. Длительная прочность в машиностроении / И.И. Гольденблат, В.Л. Бажанов, В.А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.

2. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости / В.В. Новожилов. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.

3. Григоренко Я.М. Решение нелинейных задач теории оболочек на ЭВМ / Я.М. Григоренко, А.П. Мукоед. – Киев: Вища шк., 1983. – 226 с.

Материал поступил в редакцию 07.04.2011.

References

1. Gol`denblat I.I. Dlitel`naya prochnost` v mashinostroenii / I.I. Gol`denblat, V.L. Bazhanov, V.A. Kopnov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 248 s. – In Russian.

2. Novozhilov V.V. Osnovy` nelinejnoj teorii uprugosti / V.V. Novozhilov. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 288 s. – In Russian.

3. Grigorenko Ya.M. Reshenie nelinejny`x zadach teorii obolochek na E`VM / Ya.M. Grigorenko, A.P. Mukoed. – Kiev: Vy`shha shk., 1983. – 226 s. – In Russian.

ANALYSIS LAYER MODEL OF POLYMER COMPOSITE DESIGN UNDER MULTIFACTOR LOADING

O.G. OSYAEV, Y.A. TATURIN, A.M. KOSTIN, A.V. ZHUKOV

(Rostov Military Institute of Rocket Forces)

A mathematical model is offered for the analysis of complex stress-strain state of the layer load-carrying structures of the aircraft planes. It is presented as sets of the equations of the constraining relations of load parameters, voltages and deformation. The complex multilayered solution method that allows including specific features of the design geometry and behaviour of structural materials through multifactor loading is used for the solution of the systems of the equations.

Keywords: *long-term strength, stress-strain state, creeping.*

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.333.2:621.3.016.1

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА В СТЕРЖНЯХ РОТОРА

М.Р. ВИНОКУРОВ
(Донской государственный технический университет),
А.А. МОИСЕЕНКО
(Омский государственный технический университет),
Н.Ю. МАСЛОВЦЕВА
(Рудненский индустриальный институт)

Проведена количественная оценка точности определения механического момента асинхронного двигателя при использовании Т-образной схемы замещения с учетом поверхностного эффекта в стержнях ротора по сравнению с Г-образной схемой замещения.
Ключевые слова: *механический момент, схема замещения, асинхронный двигатель, скольжение, вихревые токи, ферромагнитная среда.*

Введение. При расчете вращающего момента асинхронного двигателя (АД), как правило, используется Г-образная схема замещения. Кроме того, отмечается [1], что переход от Т-образной схемы замещения к упрощенной Г-образной приводит к погрешности 3-5% в определении силы тока ротора. Если учесть, что момент АД пропорционален квадрату тока ротора, то погрешность определения момента АД оказывается весьма существенной. Известно также, что на величину вращающего момента оказывают влияние вихревые токи в стержнях ротора и нелинейность магнитных характеристик статора [2].

Постановка задачи и метод исследования. Рассмотрим результаты расчета вращающего момента для Г-образной схемы замещения. Как известно [1], если пренебречь действием тока намагничивания в поперечной ветви (т.е. принять его равным нулю) и не учитывать действие вихревых токов, то схема замещения АД имеет вид, показанный на рис.1, где R_1 – активное сопротивление обмотки статора; jX_1 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; R'_2 – приведенное активное сопротивление обмотки ротора; jX'_2 – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора; $R'_2\frac{1-s}{s}$ – приведенное сопротивление, учитывающее активную мощность, эквивалентную механическому моменту АД; s – скольжение.

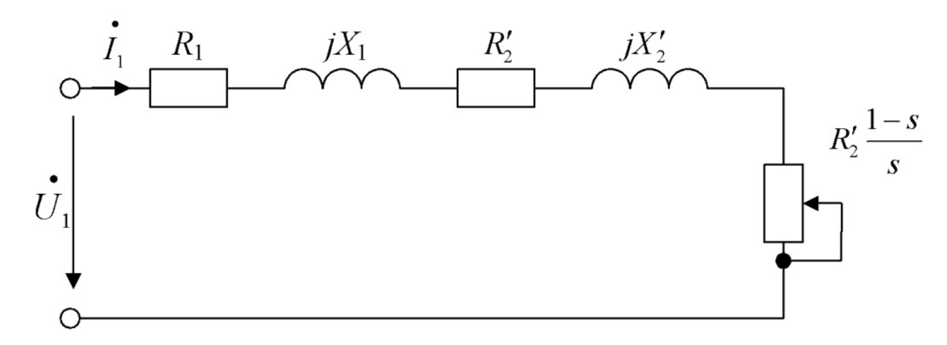


Рис.1. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Вращающий момент в этом случае определяется известным выражением [1]:

$$M_{\text{ГСЗ}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\omega} = \frac{mI'^2_{2\Gamma}R'_2\frac{1}{s}}{\omega} = \frac{mR'_2}{\omega s}\frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}, \tag{1}$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность АД; ω – угловая скорость АД; m – поправочный коэффициент; $I'_{2\Gamma}$ – приведенный ток в нагрузке Г-образной схемы замещения; U_1 – действующее значение напряжения фазы статорной обмотки.

Расчет вращающего момента по приведенному соотношению (1) дает завышенные результаты по двум причинам. Одна заключается в том, что в этой схеме замещения не учитывается влияние на ток ротора тока намагничивания в поперечной ветви, который создает падение напряжения на сопротивлениях обмотки статора, что приводит к уменьшению мощности на приведенном сопротивлении ротора R'_2. Другая обусловлена тем, что не учитывается влияние вихревых токов в стержнях ротора.

Если рассмотреть вращающий момент, получаемый с использованием Т-образной схемы замещения, т.е. учесть ветвь намагничивания (рис. 2), то для расчета приведенного комплексного значения тока ротора I'_2 можно получить выражение вида:

$$\dot{I}'_2 = \dot{U}_1\frac{R_0 + jX_0}{M + jN}, \tag{2}$$

где

$$M = R_1R_0 - X_1X_0 + R_1\frac{R'_2}{s} - X_1X'_2 + R_0\frac{R'_2}{s} - X_0X'_2;$$

$$N = R_0X_1 + R_1X_0 + \frac{R'_2}{s}X_1 + R_1X'_2 + \frac{R'_2}{s}X_0 + R_0X'_2.$$

Выражение для I'_2 в источнике [1] приводится в несколько иной форме. На наш взгляд, целесообразно использовать выражение (2) для удобства сравнения с выражением для момента, определяемого по Г-образной схеме замещения.

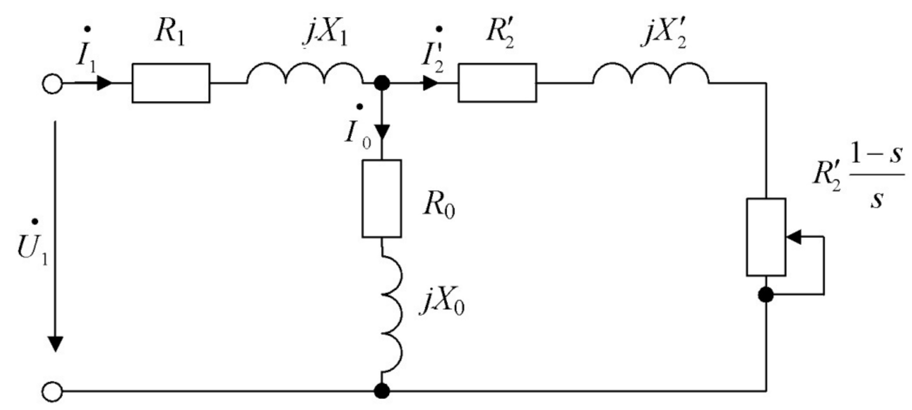


Рис.2. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

С учетом зависимости (2) вращающий момент АД для Т-образной схемы замещения АД можно рассчитать следующим образом:

$$M_{\text{ТСЗ}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\omega} = \frac{m\dot{I}'^2_2R'_2/s}{\omega} = \frac{U_1^2}{\omega}\frac{m(R_0^2 + X_0^2)}{(M^2 + N^2)}R'_2/s = \Pi\left(\frac{m}{\omega}\right)U_1^2/s, \tag{3}$$

$$\Pi = \frac{(R_0^2 + X_0^2)R'_2}{M^2 + N^2},$$

где Π – вещественный коэффициент для данного типа АД, определяемый параметрами эквивалентной схемы замещения и скольжения.

Выражение (3) позволяет выполнять расчет вращающего момента в реальном времени с помощью микроконтроллера, при этом требуется измерять всего 2 рабочих параметра – напряжение питания и частоту вращения двигателя.

Проведем сравнение расчетных данных вращающего момента, полученных по формулам (1) и (3) (т.е. для Г- и Т-образной схем замещения АД) для асинхронного двигателя типа 4А80А2У3 со следующими паспортными данными:

– номинальное напряжение U_1, В .... 3×220/380
– номинальная мощность $P_{2ном}$, кВт 1,5
– номинальное скольжение $s_{ном}$ 0,042
– критическое скольжение $s_{кр}$ 0,37
– номинальная частота напряжения питания $f_{1ном}$, Гц 50
– номинальная частота вращения ротора $n_{2ном}$, мин$^{-1}$ 2835

Параметры схемы замещения, Ом: X_1=3,73, R_1=7,82, X'_2=4,21, R'_2=2,91, X_0=133, R_0=11,8. Эквивалентные параметры АД приведены в справочнике [3].

Расчетные значения вращающего момента получены для значений скольжения в диапазоне $0{,}01 \le s \le s_{кр}$ и приведены в табл.1.

Таблица 1

Вращающий момент, Н·м	s			$s_н$			$s_{кр}$
	0,01	0,02	0,03	0,042	0,1	0,2	0,37
$M_{ГСЗ}$	1,49	2,8	3,94	5,33	8,49	9,55	7,41
$M_{ТСЗ}$	1,4	2,63	3,71	5,04	8,1	9,19	7,15

Относительные значения разностей вращающих моментов (относительная погрешность), вычисленных по Г- и Т-образной схемам замещения, определяются следующим образом:

$$\delta = \frac{M_{ГСЗ} - M_{ТСЗ}}{M_{ГСЗ}} \cdot 100\% .$$

Значения δ в зависимости от скольжения s приведены в табл.2. График зависимости $\delta=f(s)$ приведен на рис.3.

Таблица 2

Погрешность	s			$s_н$			$s_{кр}$
	0,01	0,02	0,03	0,042	0,1	0,2	0,37
δ, %	6,27	6,01	5,77	5,7	4,57	3,8	3,46

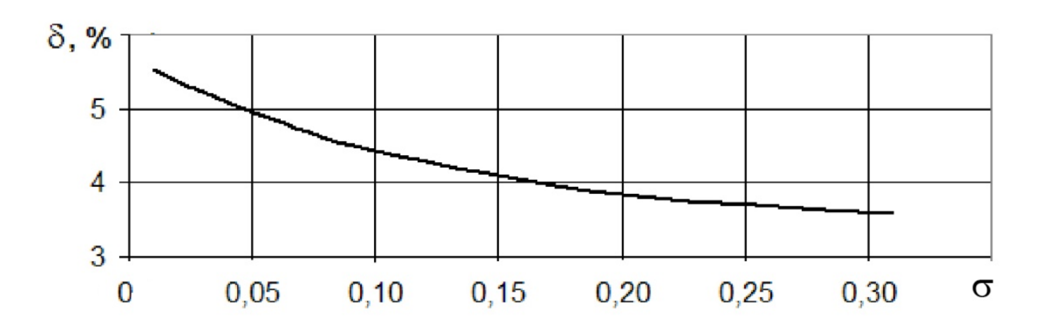


Рис.3. Зависимость δ от скольжения s

Как видно из приведенных расчетных данных, использование Т-образной схемы замещения позволяет существенно увеличить точность расчета вращающего момента.

Однако расчет вращающего момента по выражению (3) основан на том, что значения самих параметров схемы замещения считаются постоянными при изменении скольжения.

В установившемся режиме работы в широком диапазоне изменения скольжения рекомендуется учитывать роторные вихревые токи, оказывающие влияние на параметры Т-образной схемы замещения [1].

Для оценки влияния вихревых токов при изменении частоты тока в стержнях ротора (изменение скольжения s) на параметры схемы замещения ротора рассмотрим зависимости полного, активного и реактивного сопротивлений стержня ротора от скольжения для АД типа 4А80А2У3. Данные зависимости получим исходя из численного расчета электромагнитного поля, создаваемого переменным током в стержне ротора. В исследовании [4] проведен численный расчет электромагнитного поля для различных форм пазов ротора, при этом не учитывается влияние ферромагнитной среды статора, что снижает точность расчета параметров стержней ротора.

Выполним расчет электромагнитного поля с учетом влияния ферромагнитной среды статора, основываясь на следующих условиях:

– решение задачи электромагнитного поля ротора осуществим в предположении, что ферромагнитные среды ротора и статора линейны;

– электропроводностью ферромагнетика ротора и статора пренебрегаем;

– материал стержней ротора – алюминий, $\gamma=37\cdot10^6$ См/м;

– геометрия и размеры пазов ротора и статора для данного типа двигателя (рис.4);

– действующее значение тока в стержне ротора 10 А;

– для расчета электромагнитного поля и параметров стержня ротора используем программу *Elcut*;

– расчет выполняем в диапазоне скольжений $s_x<s<3s_{ном}$, скольжение моделируем через задание соответствующей частоты переменного тока стержня ротора.

Рис.4. Геометрия и размеры пазов ротора и статора асинхронного двигателя 4А80А2У3

С учетом вращения ротора относительно статора, взаимное расположение пазов ротора и статора в различные моменты времени изменяется, при этом можно выделить два крайних случая:

– статор представлен сплошным металлическим телом ($\mu>>\mu_0$, $\gamma\approx0$);

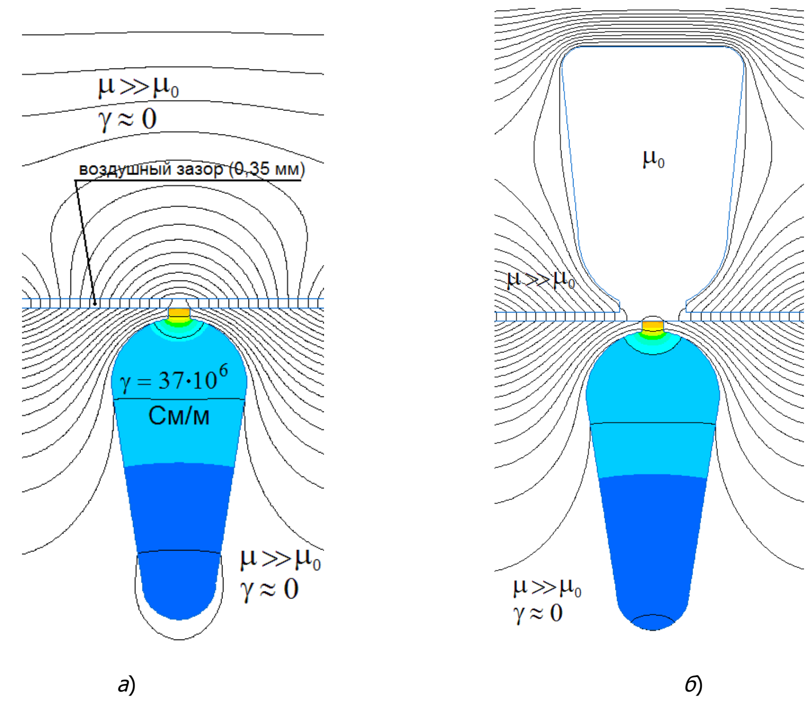
– паз статора расположен симметрично над пазом ротора.

Для учета ферромагнитной среды статора необходимо выполнить расчет электромагнитного поля и параметров стержня ротора для двух указанных крайних случаев, а затем, используя расчетные данные, вычислить средние значения этих параметров.

На рис.5 показаны расчетные силовые линии индукции магнитного поля, создаваемого переменным током в стержне ротора для двух крайних случаев.

В табл.3 приведены результаты расчета параметров алюминиевого стержня с учетом действия поверхностного эффекта на различных частотах тока в стержне ротора для случая, когда статор представлен сплошным металлическим телом (рис.5, *а*).

В табл.4 приведены результаты расчета параметров алюминиевого стержня с учетом действия поверхностного эффекта на различных частотах тока в стержне ротора для случая, когда паз статора расположен симметрично над пазом ротора (рис.5, *б*).



а) *б*)

Рис.5. Расчетная картина магнитного поля, создаваемого переменным током в стержне ротора двигателя 4А80А2У3: *а* – статор представлен сплошным металлическим телом; *б* – паз статора расположен над пазом ротора

Таблица 3

s	f, Гц	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
0,12	6	6,766E-04	4,295E-04	5,228E-04	1,387E-05
0,1	5	6,116E-04	4,293E-04	4,356E-04	1,387E-05
0,08	4	5,528E-04	4,291E-04	3,485E-04	1,387E-05
0,06	3	5,024E-04	4,290E-04	2,614E-04	1,387E-05
0,042	**2,1**	**4,663E-04**	**4,289E-04**	**1,830E-04**	**1,387E-05**
0,03	1,5	4,483E-04	4,289E-04	1,307E-04	1,387E-05
0,02	1	4,376E-04	4,289E-04	8,713E-05	1,387E-05
0,0032	0,16	4,291E-04	4,288E-04	1,394E-05	1,387E-05

Таблица 4

s	f, Гц	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
0,12	6	6,542E-04	4,295E-04	4,935E-04	1,309E-05
0,1	5	5,945E-04	4,293E-04	4,113E-04	1,309E-05
0,08	4	5,407E-04	4,291E-04	3,290E-04	1,309E-05
0,06	3	4,949E-04	4,290E-04	2,468E-04	1,309E-05
0,042	**2,1**	**4,624E-04**	**4,289E-04**	**1,727E-04**	**1,309E-05**
0,03	1,5	4,463E-04	4,289E-04	1,234E-04	1,309E-05
0,02	1	4,367E-04	4,289E-04	8,225E-05	1,309E-05
0,0032	0,16	4,290E-04	4,288E-04	1,316E-05	1,309E-05

На основе расчетных данных, приведенных в табл.3 и 4 для двух крайних случаев расположения пазов ротора относительно пазов статора, рассчитаны средние значения полного, активного и реактивного сопротивлений стержня на единицу длины для различных значений скольжения. Результаты расчета приведены в табл.5.

Таблица 5

s	f, Гц	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	L, Гн
0,12	6	6,654E-04	4,295E-04	5,08E-04	1,350E-05
0,1	5	6,031E-04	4,293E-04	4,23E-04	1,350E-05
0,08	4	5,468E-04	4,291E-04	3,39E-04	1,350E-05
0,06	3	4,987E-04	4,290E-04	2,54E-04	1,350E-05
0,042	**2,1**	**4,644E-04**	**4,289E-04**	**1,78E-04**	**1,350E-05**
0,03	1,5	4,473E-04	4,289E-04	1,27E-04	1,350E-05
0,02	1	4,372E-04	4,289E-04	8,47E-05	1,350E-05
0,0032	0,16	4,291E-04	4,288E-04	1,36E-05	1,350E-05

Примем значения сопротивлений стержня ротора при номинальном режиме ($s_{\text{ном}}$=0,042 для выбранного типа двигателя) за 100% и рассчитаем относительные изменения этих значений сопротивлений в зависимости от скольжения по выражениям:

$$\varepsilon_{Z_i} = \frac{Z_i - Z_{\text{Н}}}{Z_{\text{Н}}} \cdot 100\,\%,$$

$$\varepsilon_{R_i} = \frac{R_i - R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}}} \cdot 100\%,$$

$$\varepsilon_{X_i} = \frac{X_i - X_{\text{Н}}}{X_{\text{Н}}} \cdot 100\%.$$

Результаты расчета сведены в табл.6.

Таблица 6

s	ε_Z, %	ε_R, %	ε_X, %
0,12	43,28	0,14	185,39
0,1	29,87	0,09	137,64
0,08	17,74	0,05	90,45
0,06	7,39	0,02	42,70
0,042	**0,00**	**0,00**	**0,00**
0,03	-3,68	0,00	-28,65
0,02	-5,86	0,00	-52,42
0,0032	-7,60	-0,02	-92,36

Из табл.6 следует, что изменение активного сопротивления ротора под действием вихревых токов незначительно и при $s=3s_{\text{ном}}$ составляет 0,14%. Изменение реактивного сопротивления стержней ротора при увеличении скольжения существенно и объясняется увеличением частоты тока, протекающего в стержнях.

Для учета изменения реактивных сопротивлений стержней ротора при расчете вращающего момента определим значения приведенного сопротивления X'_2 для эквивалентной схемы замещения при выбранном значении скольжения по формуле:

$$X''_{2i} = X'_2 + X'_2 \frac{\varepsilon_{X_i}}{100},$$

где $X'_2 \frac{\varepsilon_{X_i}}{100}$ – приращение приведенного реактивного сопротивления ротора в зависимости от скольжения.

Уточненный расчет вращающего момента выполнен по выражению (3) с учетом изменения реактивных сопротивлений стержней ротора.

Результаты расчета значений вращающего момента сведены в табл.7:

– для Г-образной схемы замещения ($M_{ГСЗ}$);

– Т-образной схемы замещения ($M_{ТСЗ}$);

– Т-образной схемы замещения с учетом изменения X'_2 ($M_{ТСЗ,П.Э}$).

Таблица 7

s	$M_{ГСЗ}$, Н·м	$M_{ТСЗ}$, Н·м	$M_{ТСЗ,П.Э}$, Н·м
0,12	10,27	9,82	8,34
0,1	9,43	9,00	8,24
0,08	8,34	7,94	7,64
0,06	6,93	6,57	6,51
0,042	**5,33**	**5,04**	**5,04**
0,03	4,06	3,82	3,83
0,02	2,85	2,68	2,69
0,0032	0,50	0,47	0,47

По данным табл.7 построены механические характеристики АД для перечисленных выше случаев (рис.6).

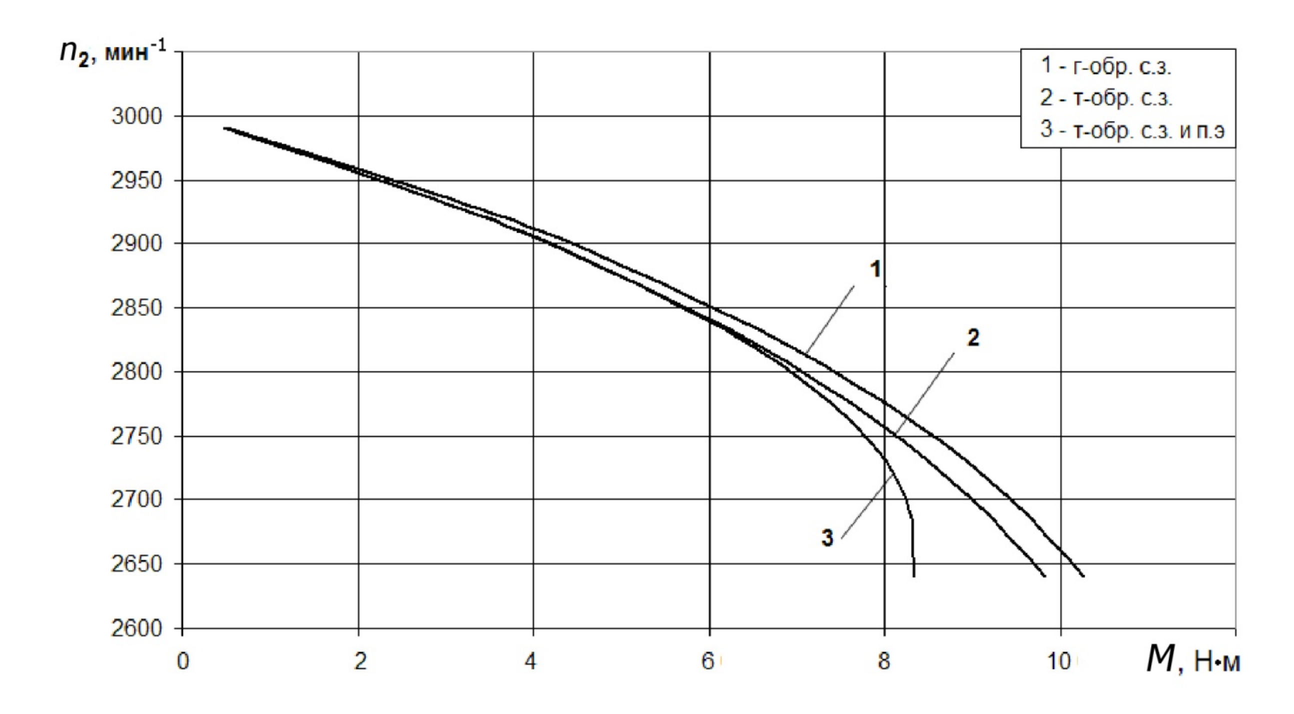


Рис.6. Расчетные механические характеристики двигателя 4А80А2У3

Полученные результаты могут быть использованы при реализации микропроцессорного устройства бесконтактного контроля вращающего момента АД [5] для уточнения косвенного метода измерения момента с использованием Т-образной схемы замещения АД в широком диапазоне изменения скольжения.

Выводы. 1. Использование Т-образной схемы замещения позволяет повысить точность расчета вращающего момента асинхронного двигателя для номинального режима на 5% по сравнению с расчетом по Г-образной схеме замещения.

2. При понижении оборотов асинхронного двигателя ниже номинальных ($s>s_{ном}$) погрешность расчета вращающего момента по Г-образной схеме замещения понижается незначительно (см. рис.3).

3. Влияние изменения реактивного сопротивления ротора X'_2 существенно возрастает при $s>2s_{ном}$.

4. При $s<3s_{ном}$ влиянием вихревых токов на изменение активных сопротивлений стержней ротора можно пренебречь.

Библиографический список

1. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк.: Логос, 2000. – 607 с.

2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для вузов. В 2 т. Т.1. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 656 с.

3. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

4. Попов А.П. Исследование поверхностного эффекта в проводниках произвольного сечения с помощью программы Elcut / А.П. Попов, А.О. Чугулёв // Омский науч. вестн. – 2009. – №3(83). – С.183-187.

5. Попов А.П. Моделирование микропроцессорного устройства контроля вращающего момента асинхронного двигателя с использованием его эквивалентной схемы замещения и импульсного датчика оборотов / А.П. Попов, М.Р. Винокуров, А.А. Моисеенко // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т.11, №1. – С.77-82.

Материал поступил в редакцию 10.05.2011.

References

1. Kopy`lov I.P. E`lektricheskie mashiny`: ucheb. dlya vuzov / I.P. Kopy`lov. – M.: Vy`ssh. shk.: Logos, 2000. – 607 s. – In Russian.

2. Ivanov-Smolenskij A.V. E`lektricheskie mashiny`: ucheb. dlya vuzov. V 2 t. T.1. – 2-e izd., pererab. i dop. / A.V. Ivanov-Smolenskij. – M.: Izd-vo ME`I, 2004. – 656 s. – In Russian.

3. Asinxronny`e dvigateli serii 4A: spravochnik / A.E`. Kravchik [i dr.]. – M.: E`nergoatomizdat, 1982. – 504 s. – In Russian.

4. Popov A.P. Issledovanie poverxnostnogo e`ffekta v provodnikax proizvol`nogo secheniya s pomoshh`yu programmy` Elcut / A.P. Popov, A.O. Chugulyov // Omskij nauch. vestn. – 2009. – #3(83). – S.183-187. – In Russian.

5. Popov A.P. Modelirovanie mikroprocessornogo ustrojstva kontrolya vrashhayushhego momenta asinxronnogo dvigatelya s ispol`zovaniem ego e`kvivalentnoj sxemy` zameshheniya i impul`snogo datchika oborotov / A.P. Popov, M.R. Vinokurov, A.A. Moiseenko // Vestn. Donsk. gos. texn. un-ta. – 2011. – T.11, #1. – S.77-82. – In Russian.

ACCURACY INCREASE OF CALCULATING INDUCTION MOTOR TORQUE BASED ON SURFACE EFFECT IN ROTOR BARS

M.R. VINOKUROV
(Don State Technical University),
A.A. MOISEYENKO
(Omsk State Technical University),
N.Y. MASLOVTSEVA
(Rudny Industrial Institute)

A quantitative assessment of the accuracy for determining the mechanical moment of the induction motor when using T equivalent circuit with skin effect in rotor bars compared with L equivalent circuit has been conducted.
Keywords: *mechanical torque, equivalent circuit, induction motor, slip, eddy currents, ferromagnetic medium.*

УДК 681.31.00

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ГРУЗОВЫХ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК*

А.В. БАСОВА
(Донской государственный технический университет),
П.Г. БЕЛЯВСКИЙ
(ООО «Спецморстрой»)

Разработан генетический алгоритм решения задачи оптимизации грузовых морских перевозок, позволяющий находить хорошее приближенное решение и имеющий приемлемую вычислительную сложность.
Ключевые слова: *генетический алгоритм, оптимизация, транспортная задача.*

Введение. Задачи рационального распределения грузопотоков при грузовых морских перевозках являются не только актуальными, но и жизненно необходимыми для руководителей соответствующих предприятий. На основе анализа существующего процесса морских перевозок возможно повысить эффективность работы транспорта, предназначенного для данных перевозок, за счет снижения стоимости перевозки груза, уменьшения количества транспорта и т.д.

Постановка задачи оптимального планирования грузопотоков. Такого рода задачу свести к одному критерию достаточно трудно, так как целей может быть много. В этом случае оптимизацию проводят по нескольким частным критериям $Q_i(\vec{x})(i=1,2,...,s)$, а полученные задачи называют задачами *многокритериальной или векторной оптимизации*. Многокритериальная оптимизация представляет собой попытку получить наилучшее значение для некоторого множества характеристик рассматриваемого объекта, т.е. найти некоторый компромисс между теми частными критериями $Q_i(\vec{x})(i=1,2,...,s)$, по которым требуется оптимизировать решение.

Будем решать двухкритериальную задачу о назначениях, минимизируя стоимость и общее время выполнения работ:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} \to \min, \\ \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} t_{ij}x_{ij} \to \min, \\ \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad j=(\overline{1,n}), \sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad i=(\overline{1,n}), x_{ij} \in \{0,1\}, \end{cases}$$

где c_{ij} – стоимость назначения i-го судна на j-й рейс; t_{ij} – время выполнения i-м судном j-го рейса.

При этом решение будем представлять в виде матрицы из нулей и единиц.

Генетический алгоритм решения многокритериальной задачи о назначениях. Опишем основные шаги разработанного алгоритма. В первую очередь осуществляется процедура инициализации стартового множества решений. Начальная популяция формируется с использованием случайных перестановок, которые преобразуются в матрицу решений. При этом все полученные хромосомы удовлетворяют ограничениям задачи. Таким образом, одновременно достигаются две цели: разнообразие стартовой популяции и повышение быстродействия за счет исключения этапа отбраковки нелегальных решений.

Воспользовавшись формулой $F = w_1 \cdot \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}x_{ij} + w_2 \cdot \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} t_{ij}x_{ij}$ для оценки годности каждого решения, определим значимость каждой хромосомы и отсортируем популяцию от лучшей к худшей. Следующий важный шаг – выбор особей для кроссинговера и мутации. Стратегия этого

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-01-00481-а).

процесса определяется для каждой конкретной задачи экспериментальным путем, поэтому наметив несколько возможных вариантов (панмиксия, инбридинг, аутбридинг, селективный отбор) и проведя серию экспериментов, возможно будет выявить наиболее подходящие способы отбора или их сочетание.

Применение операторов кроссинговера и мутации сопровождается дилеммой: использовать фиксированное число особей для обработки генетическими операторами или применить более мягкую «вероятностную» стратегию? Получив в результате действия генетических операторов определенное количество потомков, перейдем к отбору особей при формировании нового поколения. Затем процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут критерий останова.

Алгоритм создания начальной популяции. Пусть множество E^0 состоит из элементов $\{1,2,\ldots,n\}$, а множество F^0 – из элементов $\{1,2,\ldots,m\}$. Генерируем случайное число i от 1 до n (т.е. $i \in E^0$) и случайное число j от 1 до m (т.е. $j \in F^0$).

Вычислим допустимое число рейсов i-го судна на j-м рейсе:

$$k_a = a_i / l_{ij}\ .$$

Вычислим необходимое число рейсов i-го судна для перевозки грузов j-го рейса:

$$k_b = \frac{b_j}{p_{ij}} + 1\,.$$

(*) Если $k_a=k_b$, то $x_{ij}=k_a=k_b$, $a_i=0$, $b_j=0$.

Если $k_a<k_b$, то $x_{ij}=k_a$, $a_i=0$, $b_j=b_j-p_{ij}x_{ij}$.

Если $k_a>k_b$, то $x_{ij}=k_b$, $a_i= a_i-l_{ij}x_{ij}$, $b_j=0$.

Если $a_i=0$ (все рабочее время исчерпано, столбец насыщен), то $E^0=E^0 \setminus i$.

Если $b_j=0$ (объем поставок выполнен, строка насыщена), то $F^0=F^0 \setminus j$.

Если $E^0\neq\varnothing$ и $F^0\neq\varnothing$, то переход в начало алгоритма, иначе – переход к (*).

Конец работы.

Операторы кроссинговера и мутации. Особи для кроссинговера выбираются с использованием различных стратегий. На селектированные индивидуальности действуют операторы кроссинговера и мутации с вероятностью $p_к$ и $p_м$ соответственно. Если $X_1, X_2, \ldots, X_p$ – допустимые решения, тогда потомки $X_1', X_2', \ldots, X_p'$ с помощью оператора кроссинговера будут создаваться по правилу:

$X_1'=c1*X_1+c2*X_2+\ldots+cp*X_p$,

$X_2'=c1*X_2+c2*X_3+\ldots+cp*X_1$,

……………………………………………

$X_p' = c1*X_p+c2*X_1+\ldots+cp*X_{p-1}$, где $c1+c2+\ldots+cp=1$.

Пусть для мутации селектирована особь X. Вычислим произведения $c_{ij} = c_{ij}(x_{ij})$. Найдем g наибольших значений c_{ij} ($i=1,2,\ldots, n$, $j=1,2,\ldots,m$) и соответствующие им элементы матрицы X: $x_{i_1 j_1}, x_{i_2 j_2}, \ldots, x_{i_g j_g}$. Определим множества: $I=\{i_1, i_2, \ldots, i_g\}$ и $J=\{j_1, j_2, \ldots, j_g\}$. Установим субматрицу W из элементов матрицы X следующим образом: элемент $x_{ij}\in X$ переходит в W тогда и только тогда, когда $i\in I$ и $j\in J$. Зададим новые значения $a(w_i)$ и $b(w_j)$:

$$a(w[i]) = \sum\nolimits_{j\in[j1,j2,\ldots jp]} l[i,j]*x[i,j], \quad 1\le i\le p, \quad b(w[j] = \sum\nolimits_{i\in[i1,i2,\ldots ip]} p[i,j]*x[i,j], \quad 1\le j\le q.$$

Подключим алгоритм создания начальной популяции. Этот алгоритм работает так, что все ограничивающие условия для $a(w_i)$ и $b(w_j)$ будут удовлетворены и получены новые значения для матрицы W. Заменяем выбранные элементы матрицы X на новые элементы из матрицы W.

Затем вновь полученные решения оцениваются, сортируются и строится новая популяция. Размер популяции в нашем алгоритме поддерживается постоянным. То есть, если после действия

генетических операторов получим популяцию размерности $p+p1$, то на следующем шаге после оценки и сортировки последние $p1$ индивидуальностей выбрасывают из популяции.

Заключение. Создан модифицированный генетический алгоритм решения двухкритериальной задачи о назначениях в целях оптимизации грузовых морских перевозок. Разработаны модифицированные операторы инициализации, кроссинговера и мутации, позволяющие получать допустимые решения исходной задачи. Теоретические и экспериментальные оценки вычислительной сложности алгоритма, полученные в результате исследований, составляют величину порядка $o(n^2)$, т.е. являются полиномиальными.

Материал поступил в редакцию 28.04.2011.

GENETIC SOLUTION METHODS FOR PROBLEM OF STORES SHIPMENT OPTIMAL PLANNING

A.V. BASOVA
(Don State Technical University),
P.G. BELYAVSKIY
(LLC 'Spetsmorstroi')

A genetic algorithm for solving the optimization problem of stores shipment is developed. The algorithm permits to find a good approximate solution, and it has acceptable computational complexity.
Keywords: *genetic algorithm, optimization, transport problem.*

УДК 004.942

ДВУМЕРНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФОКУСИРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ FreeFem++

Л.В. САХАРОВА
(Филиал Морской государственной академии им. адмирала Ф.Ф. Ушакова в г. Ростове-на-Дону)

Решена задача о 2D-распределении биополимеров при изоэлектрическом фокусировании в прямоугольной электрофоретической камере в иммобилизованном градиенте pH. Программное обеспечение, созданное на языке FreeFem++, позволяет в наглядной форме исследовать картину изоэлектрического фокусирования во времени, а также моделировать и оптимизировать реальный эксперимент.
Ключевые слова: *изоэлектрическое фокусирование, математическое моделирование, метод конечных элементов, интегрированная среда разработки, FreeFem++.*

Введение. Изоэлектрическое фокусирование (ИЭФ) является одним из наиболее эффективных электрохимических методов, применяемых для идентификации компонентов и фракционирования многокомпонентных биохимических смесей. Этот метод широко используется в биохимии, различных отраслях медицины, генетике, фармакологии, пищевой промышленности.

Основной задачей математического моделирования ИЭФ является создание моделей, позволяющих повысить разрешающую способность метода, оптимизировать эксперимент в целях экономии материальных и временных затрат. Для этого необходимы наглядные модели, позволяющие исследовать процесс ИЭФ во времени, а также установить взаимосвязь между динамикой процесса и параметрами электрофоретической камеры (ЭК).

На решение перечисленных задач направлены наши исследования. Полученная модель основана на классических математических моделях [1, 2] и содержит новый подход к их решению в интегрированной среде разработки FreeFem++ [3].

Язык программирования FreeFem++ выбран как оптимальный для решения указанной задачи по ряду причин. Во-первых, FreeFem++ изначально предназначен для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в 2D-пространственном случае. Во-вторых, по сравнению с коммерческими пакетами, предназначенными для решения уравнений в частных производных, FreeFem++ обладает уникальной возможностью доступа ко всем внутренним данным и возможностью создания собственных алгоритмов. В-третьих, в настоящее время существует развитая теория решения задач математической физики средствами языка FreeFem++, в частности, разработан обширный математический аппарат для решения задач электрофореза как метода разделения многокомпонентных смесей на отдельные компоненты при помощи внешнего электрического поля [4]. В-четвертых, язык FreeFem++ относительно прост в использовании, поскольку запись алгоритмов на нем близка к C++, а эффективность кода по скорости близка к оптимальной. Наконец, в-пятых, язык FreeFem++ обладает развитым интерфейсом, имеет собственный «визуализатор», поддерживающий рисование сетки, изолиний конечно-элементарных линий и векторных полей.

Применение языка FreeFem++ в рассматриваемом случае позволило создать программное обеспечение, моделирующее поведение сложных систем биополимеров в заданных условиях ИЭФ.

Физическая постановка задачи. В электрофоретическую камеру, имеющую форму прямоугольника длиной l и высотой h, помещена смесь N биополимеров в виде пятна заданной конфигурации. В ЭК задан фиксированный градиент pH.

Для каждого из биополимеров известны его константы диссоциации $pK_1^{(k)}$, $pK_2^{(k)}$, а также коэффициенты миграции μ_k. Известно также количество биополимеров D_k, помещенных в ЭК. Предполагается, что температура внутри ЭК постоянна и равна T.

Требуется исследовать динамику концентрации каждого из *N* биополимеров во времени под действием электрического поля: рассчитать неизвестную концентрацию биополимеров $\xi_k = \xi_k\left(x, y, t\right)$, $k = 1, 2, ..., N$ и визуализировать результаты расчетов с помощью линий уровня.

Математическая постановка задачи. Предполагается, что диссоциация биополимера под номером *k* описывается уравнениями:

$$\mathrm{NH_3^+RCOOH} \Leftrightarrow \mathrm{NH_2RCOOH{+}H^+}, \qquad \mathrm{NH_2RCOOH} \Leftrightarrow \mathrm{NH_2RCOO^-{+}H^+}.$$

Молярные концентрации $\mathrm{NH_3^+RCOOH}$, $\mathrm{NH_2RCOO^-}$, $\mathrm{NH_2RCOOH}$ – положительного, отрицательного и «нейтрального» ионов биополимера – обозначим ξ_1^k, ξ_{-1}^k, ξ_0^k. Аналитическая концентрация биополимера определяется формулой: $\xi_k = \xi_1^k + \xi_0^k + \xi_{-1}^k$. В равновесном состоянии концентрации ионов связаны с аналитической концентрацией следующими соотношениями:

$$\xi_1^k = \alpha_1^k \xi_k, \qquad \xi_{-1}^k = \alpha_{-1}^k \xi_k, \qquad \xi_0^k = (1 - \alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\xi_k,$$

$$\alpha_1^k = \frac{H^2}{K_1^{(k)}K_2^{(k)} + K_1^{(k)}H + H^2}, \quad \alpha_2^k = \frac{K_1^{(k)}K_2^{(k)}}{K_1^{(k)}K_2^{(k)} + K_1^{(k)}H + H^2},$$

где α_1^k и α_2^k – степень диссоциации биополимера; H – концентрация ионов водорода.

В условиях иммобилизованного (фиксированного) градиента pH (т.е. функции $H = H(x, y)$, заданной в области $D = \{x \in [0; l], y \in [0; h]\}$ и неизменной во времени) концентрации биополимеров описываются краевой задачей:

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial t} - \mathrm{div}\left(D_k \cdot \nabla \xi_k + \mu_k \xi_k (\alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\nabla\phi\right) = 0, \quad k = 1, 2, ..., N \tag{1}$$

$$\sigma \cdot \Delta\phi + \nabla\phi \cdot \nabla\sigma = 0, \tag{2}$$

$$\sigma = \sum_{k=1}^{N} \mu_k \left(\alpha_1^k + \alpha_{-1}^k\right)\xi_k + \mu_H H, \tag{3}$$

$$\left(D_k \cdot \frac{\partial \xi_k}{\partial \bar{n}} + \mu_k \xi_k \bar{n}(\alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\nabla\phi\right)\Bigg|_{\partial D} = 0, \tag{4}$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial \bar{n}}\right)\Bigg|_{y=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial \bar{n}}\right)\Bigg|_{y=h} = 0, \tag{5}$$

$$\phi\big|_{x=0} = \phi_1, \qquad \phi\big|_{x=l} = \phi_2, \tag{6}$$

$$\iint\limits_D \xi_k\left(x, y\right) dx dy = M_k, \tag{7}$$

где σ – проводимость среды в ЭК; ϕ – потенциал электрического поля в ЭК; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$ – градиент функции; D_k – коэффициенты диффузии, связанные с коэффициентами миграции известным уравнением:

$$D_k = \varepsilon\mu_k,$$

где $\varepsilon = RT / F$.

Уравнение (1) есть уравнение массопереноса, полученное на основании уравнения потока биополимера и основного уравнения теории переноса. Уравнения (2), (3) выражают закон Ома,

записанный в предположении, что электрический ток в растворе создается миграцией биополимеров, а также ионов водорода. Краевое условие (4) отражает факт, что граница ЭК непроницаема для электролита и, следовательно, поток каждого из биополимеров через границу равен нулю. Краевые условия (5) соответствуют предположению о том, что верхняя и нижняя границы области изолированы, а значит, электрический ток через них равен нулю. Условия (6) означают, что для ЭК определена разность потенциала между ее левой и правой границами. Наконец, интегральное условие (7) отражает тот факт, что масса каждого биополимера в течение всего эксперимента остается неизменной и равной M_k.

Следует учесть, что при интегрировании представленной интегродифференциальной краевой задачи требуется также использовать распределение в начальный момент времени $\xi_k^0 = \xi_k\left(x, y, 0\right)$ в некоторой заданной ограниченной области.

Система уравнений (1)-(7) представляет собой серьезную проблему для численного решения, в первую очередь, из-за наличия интегрального условия (7). Решение ее классическими конечно-разностными методами требует предварительных преобразований системы, составления сложного алгоритма, значительного объема вычислений.

В то же время, применение интегрированной среды разработки FreeFem++ к решению задачи позволяет минимизировать как предварительные преобразования, так и непосредственную вычислительную работу.

Численная реализация задачи на FreeFem++. Алгоритм решения рассматриваемой задачи на языке FreeFem++ включал в себя шесть основных этапов. Рассмотрим кратко каждый из них.

Параметризация границ области интегрирования. В соответствии со стандартами FreeFem++, граница области была обозначена через Г (замкнутый прямоугольный контур, обходимый против часовой стрелки); при этом нижнюю и верхнюю границы области обозначали $L_1\left(y=0\right)$ и $L_3\left(y=h\right)$; правую и левую соответственно $L_2\left(x=l\right)$ и $L_4\left(x=0\right)$ (рис.1).

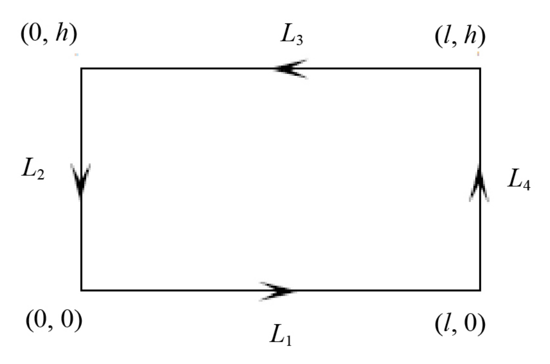


Рис.1. Область интегрирования $D=\left\{\left(x, y\right) : \left[0, l\right]\times\left[0, h\right]\right\}$

Аппроксимация временных производных. В соответствии с требованиями языка FreeFem++ задача была приведена к слабой (вариационной) формулировке. Однако непосредственное (без составления алгоритма) решение возможно только для линейных стационарных задач. Поскольку рассматриваемая задача моделирования ИЭФ достаточно сложна, потребовалось пошаговое решение, позволяющее свести исходную задачу к набору линейных краевых задач.

Поиск решения задачи (1)-(7) осуществляли на интервале времени $\left[0, T\right]$. Был задан набор значений $t_m = m\tau$, где τ – шаг по времени, а также введены обозначения:

$$\xi_k^m\left(x, y\right) = \xi_k\left(x, y, t_m\right), \qquad t_m = m\tau .$$

С учетом аппроксимации производной по времени конечной разностью задача (1)-(7) была преобразована к виду:

$$\frac{\xi_k^{m+1}-\xi_k^m}{\tau}-\operatorname{div}\left(D_k\cdot\nabla\xi_k^{m+1}+\mu_k\xi_k^{m+1}(\alpha_1^k-\alpha_{-1}^k)\nabla\phi^m\right)=0, \qquad k=1,2,\dots,N \tag{8}$$

$$\alpha_1^k=\frac{\left(H^{m+1}\right)^2}{K_1^{(k)}K_2^{(k)}+K_1^{(k)}H^{m+1}+\left(H^{m+1}\right)^2}, \quad \alpha_2^k=\frac{K_1^{(k)}K_2^{(k)}}{K_1^{(k)}K_2^{(k)}+K_1^{(k)}H^{m+1}+\left(H^{m+1}\right)^2}, \tag{9}$$

$$\sigma^m\Delta\phi^m+\nabla\phi^m\nabla\sigma^m=0, \tag{10}$$

$$\sigma^m=\sum_{k=1}^{N}\mu_k\left(\alpha_1^k+\alpha_2^k\right)\xi_k^m+\mu_H H^m, \tag{11}$$

$$\left.\left(D_k\frac{\partial\xi_k^{m+1}}{\partial\bar{n}}+\mu_k\xi_k^{m+1}\bar{n}(\alpha_1^k-\alpha_{-1}^k)\nabla\phi^m\right)\right|_{\partial D}=0, \tag{12}$$

$$\left.\left(\frac{\partial\phi^m}{\partial\bar{n}}\right)\right|_{y=0}=0, \qquad \left.\left(\frac{\partial\phi^m}{\partial\bar{n}}\right)\right|_{y=h}=0, \tag{13}$$

$$\phi^m\big|_{x=0}=\phi_1, \qquad \phi\big|_{x=l}=\phi_2, \tag{14}$$

$$\iint_D\xi_k^{m+1}\left(x,y\right)dxdy=M_k. \tag{15}$$

Таким образом, если $\xi_k^m\left(x,y\right)=\xi_k\left(x,y,t_m\right)$ и $\phi^m\left(x,y\right)=\phi\left(x,y,t_m\right)$ известны, то для определения функции $\xi_k^{m+1}\left(x,y\right)=\xi_k\left(x,y,t_{m+1}\right)$ имеет место стационарная краевая задача (8)-(15). Решая ее для $m=0,1,\dots,n$, можно получить приближенное решение нестационарной задачи. Для решения задачи используется неявная аппроксимация, т.е. все члены уравнений, не содержащие производной по времени, выбираются в точке $t_{m+1}=\left(m+1\right)\tau$, а аппроксимация производной по времени осуществляется в точке $t_m=m\tau$.

Переход к слабой (вариационной) формулировке задачи. В основе метода конечных элементов лежит приведение задачи к слабой (вариационной) формулировке.

Первоначально был осуществлен переход к слабой формулировке уравнения (10). Для этого использовали исходное уравнение, приводящее к уравнению (10):

$$\operatorname{div}\left(\sigma^m\nabla\phi^m\right)=0.$$

Умножение исходного уравнения на пробную (тестовую) функцию θ, интегрирование по области D с последующим интегрированием по частям привело к уравнению:

$$\iint_D\sigma^m\nabla\phi^m\nabla\theta dxdy+\oint_\Gamma\theta\sigma^m\frac{\partial\phi^m}{\partial\bar{n}}ds=0.$$

В соответствии с краевыми условиями (13)

$$\int_{L_1\cup L_3}\theta\sigma^m\frac{\partial\phi^m}{\partial\bar{n}}ds=0,$$

а значит,

$$\iint_D\sigma^m\left(\frac{\partial\phi^m}{\partial x}\frac{\partial\theta}{\partial x}+\frac{\partial\phi^m}{\partial y}\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)dxdy+\int_{L_2\cup L_4}\theta\sigma^m\frac{\partial\phi^m}{\partial\bar{n}}ds=0. \tag{16}$$

Из краевых условий (14) следует, что

$$\phi^m\Big|_{L_4} = \phi_1, \qquad \phi\Big|_{L_2} = \phi_2. \tag{17}$$

В языке FreeFem++ имеется большой набор быстрых алгоритмов для решения задач, приведенных к слабой формулировке. В данном случае для решения задачи (16), (17) был выбран стандартный код с привлечением LU-алгоритма:

```
problem pbPhi(phi, v, solver = LU) =
int2d(Th)( sigma * (dx(phi) * dx(v) + dy(phi) * dy(v)))
+on(L4, phi = phi1) + on(L2, phi = phi2).
```

Аналогично была получена слабая формулировка уравнений (8). Умножение каждого из уравнений (8) на пробную (тестовую) функцию θ_k и интегрирование по частям в области D привело к уравнению:

$$\iint_D \theta_k \operatorname{div}\left(D_k \nabla \xi_k^{m+1} + \mu_k \xi_k^{m+1}(\alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\nabla\phi^m\right) =$$

$$= \iint_D \nabla\theta_k \left(D_k \nabla \xi_k^{m+1} + \mu_k \xi_k^{m+1}(\alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\nabla\phi^m\right) dxdy +$$

$$+\oint_\Gamma \theta_k \left(D_k \frac{\partial \xi_k^{m+1}}{\partial \bar{n}} + \mu_k \xi_k^{m+1}(\alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\frac{\partial \phi^m}{\partial \bar{n}}\right) ds.$$

В силу краевого условия (12) криволинейный интеграл в правой части последнего уравнения равен нулю, а значит, уравнение принимает вид:

$$\iint_D \left[\theta_k \frac{\xi_k^{m+1} - \xi_k^m}{\tau} + D_k \nabla\theta_k \nabla\xi_k^{m+1} + \mu_k \xi_k^{m+1}(\alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\nabla\theta_k \nabla\phi^m\right] dxdy = 0.$$

В соответствии с требованиями языка полученные уравнения необходимо просуммировать по всем k, в результате чего получим слабую формулировку задачи, состоящей из уравнений (8), (12):

$$\sum_{k=1}^{N} \iint_D \left(\frac{\theta_k \xi_k^{m+1}}{\tau} + D_k\left(\frac{\partial \xi_k^{m+1}}{\partial x}\frac{\partial \theta_k}{\partial x} + \frac{\partial \xi_k^{m+1}}{\partial y}\frac{\partial \theta_k}{\partial y}\right)\right) dxdy +$$

$$+\iint_D \left(\mu_k \xi_k^{m+1}(\alpha_1^k - \alpha_{-1}^k)\left(\frac{\partial \phi^m}{\partial x}\frac{\partial \theta_k}{\partial x} + \frac{\partial \phi^m}{\partial y}\frac{\partial \theta_k}{\partial y}\right)\right) dxdy - \iint_D \theta_k \frac{\xi_k^m}{\tau} dxdy = 0. \tag{18}$$

Для решения задачи (18) также был выбран код с использованием LU-алгоритма (для простоты рассмотрен случай $N = 2$):

```
problem pb4c(c1, c2, v1, v2, init = m, solver = LU)
= int2d(Th)( c1 * v1/dt + epsilon1 * (dx(c1) * dx(v1) + dy(c1) * dy(v1)))
+int2d(Th)( mu1 * ff * c1 * (dx(phi) * dx(v1) + dy(phi) * dy(v1)))
-int2d(Th)( cold1/dt * v1 )
+int2d(Th)( c2 * v2/dt + epsilon2 * (dx(c2) * dx(v2) + dy(c2) * dy(v2)))\
+int2d(Th)( mu2 * ff * c2 * (dx(phi) * dx(v2) + dy(phi) * dy(v2)))
-int2d(Th)( cold2/dt * v2 );
```

Стандартные действия. *Для параметризации границ* области был использован следующий код:

```
x1 = 0; y1 = 0; x2 = w1; y2 = 0; x3 = w1; y3 = h1; x4 = 0; y4 = h1;
border L1(t = 0,1){ x = (1 - t) * x1 + t * x2; y = (1 - t) * y1 + t * y2; };
```

$$border\ L2(t=0,1)\{\ x=(1\text{-}t)*x2+t*x3;\ y=(1\text{-}t)*y2+t*y3;\ \};$$
$$border\ L3(t=0,1)\{\ x=(1\text{-}t)*x3+t*x4;\ y=(1\text{-}t)*y3+t*y4;\ \};$$
$$border\ L4(t=0,1)\{\ x=(1\text{-}t)*x4+t*x1;\ y=(1\text{-}t)*y4+t*y1;\ \};$$

Триангуляция области (т.е. замена ее конечным набором треугольников) осуществлялась посредством оператора

$$mesh\ Th = buildmesh(L1(10*n)+L2(5*n)+L3(10*n)+L4(5*n))$$

и приводила к генерированию сетки (рис.2).

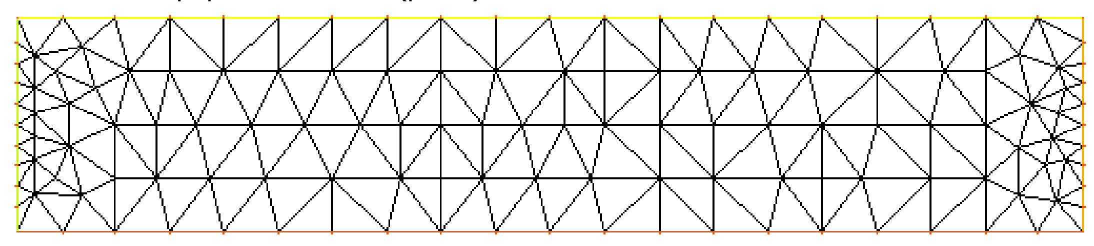


Рис.2. Сетка интегрирования

В качестве *конечных элементов* были выбраны кусочно-квадратичные непрерывные конечные элементы $Vh(Th,P2)$, обеспечивающие одновременно высокую точность и скорость решения.

Организация цикла движения по времени. Особого внимания при создании программного обеспечения потребовало создание цикла движения по времени. Цикл был организован с помощью стандартного оператора $for(m=0;m<1000;m++)$, на каждом шаге которого требовалось *обеспечивать условие нормировки.*

При решении задачи необходимо было иметь в виду, что по физическому смыслу концентрация биополимера есть величина неотрицательная. Одним из приемов, который можно использовать для сохранения неотрицательности, является обработка на каждом временном шаге дискретного набора концентраций в узлах сетки. Если шаг расчета достаточно мал и при вычислении решения в каких-либо узлах появляются отрицательные значения концентраций, то их можно принять равными нулю.

Пусть на некотором временном шаге t_m существует решение, которое обозначим $\xi_k^*(x,y,t_m)$. Определим отклонение среднего значения вычисленной концентрации от действительного значения по формуле:

$$\frac{1}{\text{mes}D}\iint\limits_D \left(\xi_k^*(x,y,t_m)-M_k\right)dxdy=\overline{\xi_k},$$

где M_k – масса k-го биополимера; $\text{mes}D$ – мера области D.

Концентрацию на $(m+1)$-м шаге вычисляем по формуле:

$$\xi_k(x,y,t_{m+1})=\xi_k^*(x,y,t_m)-\overline{\xi_k}.$$

Очевидно, что в этом случае масса будет сохраняться автоматически:

$$\iint\limits_D \xi_k^{m+1}(x,y)\,dxdy=M_k, \qquad k=1,\ldots,N,$$

что соответствует условию нормировки (15).

Перерасчет концентрации осуществлялся с помощью следующих кодов:

$$for\ (\text{int}\ j=0;j<c1[].n;j++)\{if\ (c1[][j]<0)\ c1[][j]=0;$$
$$for\ (\text{int}\ j=0;j<c2[].n;j++)\{if\ (c2[][j]<0)\ c2[][j]=0;\}$$
$$real\ averC1=(\text{int}2d(Th)(c1)-massac1)/area0; \qquad c1=c1-averC1;$$
$$real\ averC2=(\text{int}2d(Th)(c2)-massac2)/area0; \qquad c2=c2-averC2;$$

Визуализация расчетов. Визуализация расчетов на каждом шаге по времени обеспечивалась кодом программы $plot(sigma, cmm=+t)$, выводившим на экран линии уровня функции σ, в полной мере отражающей распределение концентраций биополимеров.

Особое внимание было уделено *вопросу о задании начального распределения концентраций* биополимеров, т.е. формы, размеров и расположения в ЭК пятна смеси разделяемых веществ. Начальное распределение полимеров задавали либо в виде круга [5]:

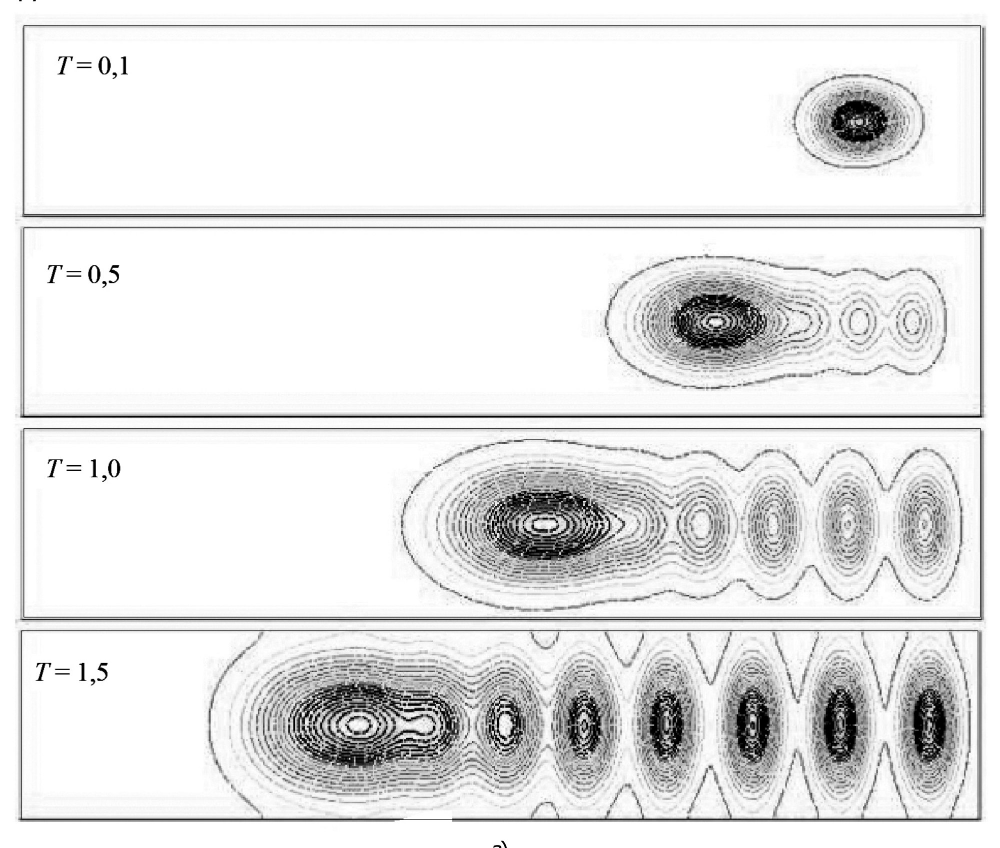
$$\xi_k^0(x,y) = A_k\left(1+\text{th}\left(-\beta\left((x-x_0)^2+(y-y_0)^2-r_0^2\right)\right)\right),$$

(A_k – амплитуда, β – параметр сглаживания, (x_0, y_0) – центр пятна, r_0 – его радиус), либо в виде прямоугольника со сглаженными углами:

$$\xi_k^0(x,y) = 0,25A_k\left[\text{th}\left(\beta_1(x-x_2)\right)-\text{th}\left(\beta_1(x-x_1)\right)\right]\left[\text{th}\left(\beta_2(y-y_2)\right)-\text{th}\left(\beta_2(y-y_1)\right)\right],$$

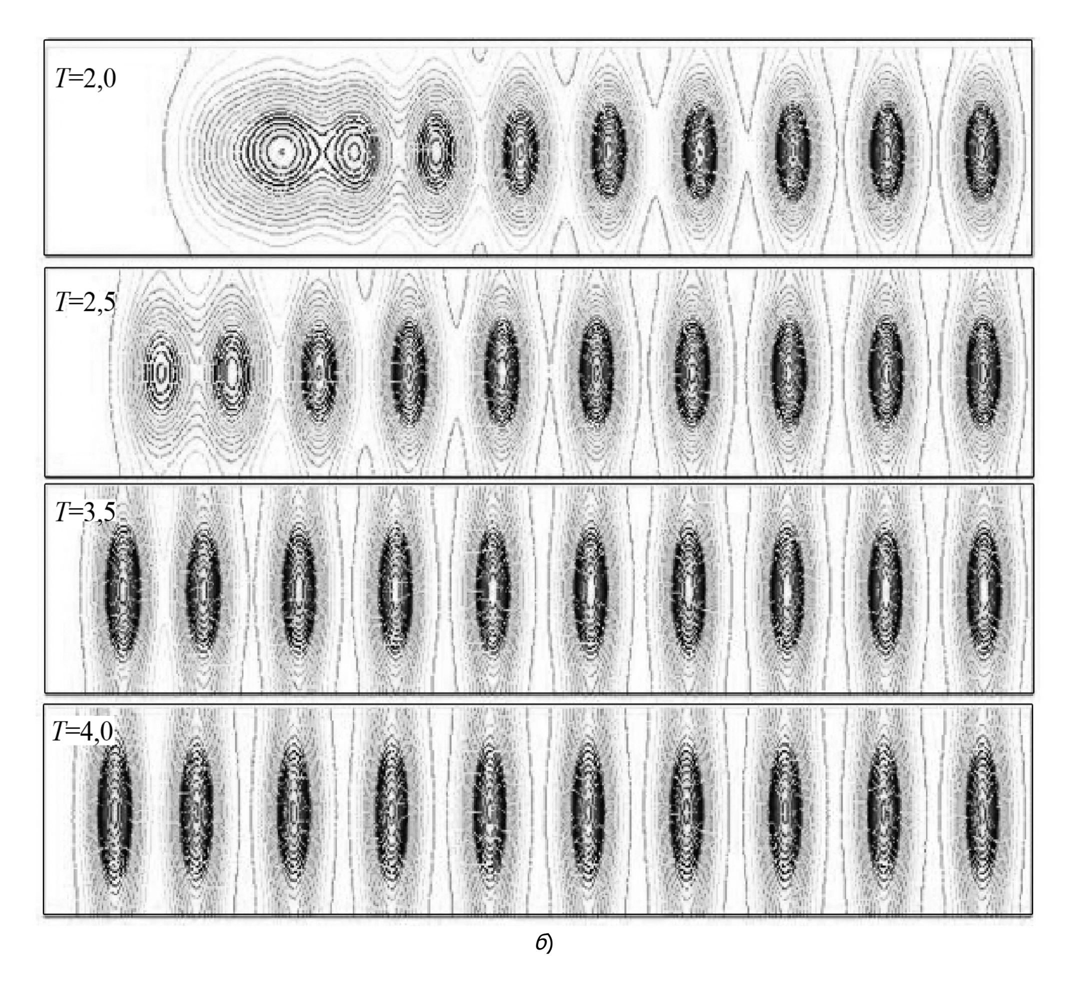
(β_1, β_2 – параметры сглаживания углов прямоугольника, занимающего область $\{(x,y): x_1 \le x \le x_2, y_1 \le y \le y_2\}$).

Исследование динамики концентраций биополимеров. *Пример 1* (рис.3). Расчеты проводили для десяти гипотетических аминокислот с равномерным распределением изоэлектрических точек: $\Delta pI = 0,3$, $\Delta pK = 0,15$. При этом предполагалось, что иммобилизованный градиент задан линейной функцией.



а)

Рис.3. Процесс ИЭФ десяти аминокислот с равномерным распределением изоточек: $\Delta pI = 0,3$, $\Delta pK = 0,15$; градиент pH линейный, $\text{pH}_n = 7,0$, $\text{pH}_k = 10,0$ (начало): *а* – первый этап; *б* – второй этап



б)

Рис.3. Окончание

Из рис.3 видно, как осуществляется процесс расслоения исходной смеси на фазы. Исходная круговая форма пятна со временем трансформируется в эллиптическую, а затем фракция приобретает вид вертикальной полосы. По окончании расслоения процесс приобретает стационарный характер, так как для $T = 3,5$ и $T = 4,0$ формы пятен имеют минимальные различия.

Численный эксперимент показал, что на итоговую картину не влияет исходная форма пятна смеси – для распределения в виде прямоугольника наблюдалась картина, аналогичная рис.3. Результаты проведенного исследования подтверждаются результатами одномерного моделирования ИЭФ [6].

Пример 2 (рис.4). Проведены расчеты для восьми стандартных аминокислот Asp, $м-АБК$, $\alpha-Asp-His$, $His-Gly-I$, $His-Gly-II$, $\beta-Ala-His$, $Tyr-Arg$, Orn.

В расчетах были использованы характеристики биополимеров-носителей [7] (см. таблицу).

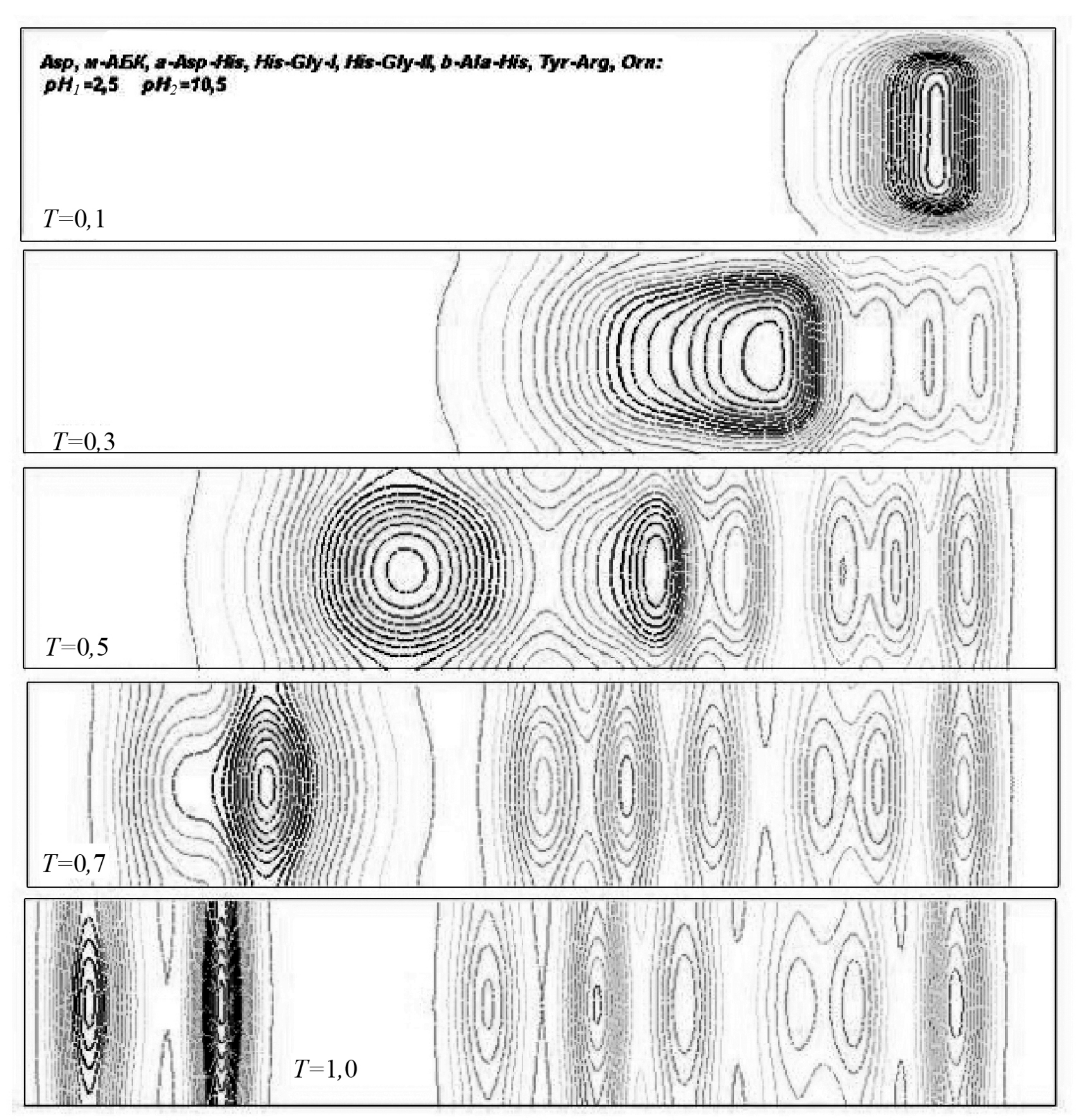


Рис.4. Процесс ИЭФ восьми стандартных аминокислот Asp, $м-АБК$, $\alpha-Asp-His$, $His-Gly-I$, $His-Gly-II$, $\beta-Ala-His$, $Tyr-Arg$, Orn; градиент pH – линейный, $\mathrm{pH}_n=2{,}5$, $\mathrm{pH}_k=10{,}5$

Характеристики стандартных аминокислот

Амино-кислота	$pK_1^{(k)}$	$pK_2^{(k)}$	pI	ΔpK	Коэффициент подвижности, $\times 10^4$
Asp	1,88	3,65	2,77	1,77	3,078
$м-АБК$	3,12	4,74	3,93	1,62	3,119
$\alpha-Asp-His$	3,02	6,82	4,92	3,80	2,187
$His-Gly-I$	5,28	7,8	6,80	2,02	2,487
$His-Gly-II$	6,27	8,57	7,42	2,30	2,487
$\beta-Ala-His$	6,83	9,51	8,17	2,68	2,3837
$Tyr-Arg$	7,55	9,80	8,68	2,25	1,638
Orn	8,65	10,76	9,70	2,11	3,223

Из рис.4 видно, что наиболее четкое разделение наблюдается для аминокислот Asp, $м-АБК$ и $\alpha-Asp-His$, поскольку шаг по ΔpI для них максимален. В то же время, $\beta-Ala-His$ и $Tyr-Arg$ выделены преимущественно в виде смеси из-за относительно близких изоэлектрических точек. Таким образом, созданное программное обеспечение позволяет предсказать поведение сложных систем биополимеров в заданных условиях ИЭФ.

Выводы. 1. Построена универсальная двумерная математическая модель ИЭФ в прямоугольной электрофоретической камере с фиксированным (иммобилизованным) градиентом pH, описывающая поведение в процессе ИЭФ заданного числа произвольных биополимеров, для которых должны быть известны константы диссоциации $pK_1^{(k)}$, $pK_2^{(k)}$, а также коэффициенты миграции μ_k. Кроме того, для работы с моделью необходимо задать градиент pH в ЭК.

Математическая модель представляет собой краевую задачу, для решения которой были использованы средства интегрированной среды разработки (языка) FreeFem++. На основе стандартных средств языка созданы собственные алгоритмы решения и программа, визуализирующая результаты расчетов и позволяющая наблюдать за трансформацией пятен биополимеров во времени.

Построенная модель позволяет исследовать динамику концентраций биополимеров в зависимости от параметров ЭК – разности потенциалов и градиента pH; параметров самих биополимеров – констант диссоциации, коэффициентов миграции, а также начальной формы пятна смеси.

2. Проведенные расчеты показали, что разделение аминокислот происходит тем лучше, чем меньше значения ΔpK по сравнению с длиной интервала между их изоэлектрическими точками.

3. На основании расчетов можно прогнозировать результат ИЭФ для заданного режима ЭК и системы биополимеров. С помощью модели также можно оптимизировать эксперимент, варьируя состав электролита, разность потенциалов и pH в ЭК. Таким образом, построенная модель может быть использована для оптимизации реального эксперимента, повышения разрешающей способности метода, а также экономии времени и средств.

Библиографический список

1. Бабский В.Г. Математическая теория электрофореза: применение к методам фракционирования биополимеров / В.Г. Бабский, М.Ю. Жуков, В.И. Юдович. – Киев: Наук. думка, 1983. – 202 с.

2. Жуков М.Ю. Массоперенос электрическим полем / М.Ю. Жуков. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 2005. – 216 с.

3. Hecht F. FreeFem++. Version 2.17-1 [Electronic resource] / F. Hecht [et al.]. – Mode of access: http://www.freefem.org/ff++.

4. Жуков М.Ю. Использование FreeFem++ для решения задач математической физики / М.Ю. Жуков, Е.В. Ширяева. – Ростов н/Д: ЦВВР, 2007.

5. Matuzevicius D. Mathematical Models of Oversaturated Protein Spots / D. Matuzevicius, A. Serackis, D. Navakauskas // Electronics and electrical engineering (Medicine technology). – 2007. – №1(73).

6. Sakharova L.V. Anomalous pH-gradient in Ampholyte Solution / L.V. Sakharova, V.A. Vladimirov, M.Y. Zhukov. – arXiv: 0902.3758vl [physics.chem-ph] 21 Feb 2009.

7. Ригетти П. Изоэлектрическое фокусирование. Теория, методы и применение / П. Ригетти. – М.: Мир, 1986. – 398 с.

Материал поступил в редакцию 25.04.2011.

References

1. Babskij V.G. Matematicheskaya teoriya e`lektroforeza: primenenie k metodam frakcionirovaniya biopolimerov / V.G. Babskij, M.Yu. Zhukov, V.I. Yudovich. – Kiev: Nauk. dumka, 1983. – 202 s. – In Russian.
2. Zhukov M.Yu. Massoperenos e`lektricheskim polem / M.Yu. Zhukov. – Rostov n/D: Izd-vo Rost. un-ta, 2005. – 216 s. – In Russian.
3. Hecht F. FreeFem++. Version 2.17-1 [Electronic resource] / F. Hecht [et al.]. – Mode of access: http://www.freefem.org/ff++.
4. Zhukov M.Yu. Ispol`zovanie FreeFem++ dlya resheniya zadach matematicheskoj fiziki / M.Yu. Zhukov, E.V. Shiryaeva. – Rostov n/D: CZVVR, 2007. – In Russian.
5. Matuzevicius D. Mathematical Models of Oversaturated Protein Spots / D. Matuzevicius, A. Serackis, D. Navakauskas // Electronics and electrical engineering (Medicine technology). – 2007. – #1(73).
6. Sakharova L.V. Anomalous pH-gradient in Ampholyte Solution / L.V. Sakharova, V.A. Vladimirov, M.Y. Zhukov. – arXiv: 0902.3758vl [physics.chem-ph] 21 Feb 2009.
7. Rigetti P. Izoe`lektricheskoe fokusirovanie. Teoriya, metody` i primenenie / P. Rigetti. – M.: Mir, 1986. – 398 s. – In Russian.

TWO-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELING OF IEF BY FreeFem++ INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT

L.V. SAKHAROVA

(Admiral Ushakov Maritime State Academy, Rostov-on-Don branch)

The problem of 2D-distribution of biopolymers by the IEF in the rectangular electrolytic cell with the immobilized pH-gradient is solved. The computer program created on the base of FreeFem++ permits to investigate temporally the IEF-process and to model and optimize a real experiment.

Keywords: *IEF, mathematical simulation, finite element method, integrated development environment, FreeFem++.*

УДК 625.032.3:681.3.06+06

ДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРИБОТЕРМОДИНАМИКИ ФРИКЦИОННЫХ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.Л. ОЗЯБКИН
(Ростовский государственный университет путей сообщения)

Выдвинута и доказана на практическом примере гипотеза экспериментальной триботермодинамики, позволяющая устанавливать значение температуры вспышки на фактической площади касания.
Ключевые слова: *физико-математическое моделирование, трибоспектральная оценка, температура вспышки, схватывание, поверхностная и объемная температуры.*

Введение. Наиболее напряженные условия взаимодействия подсистемы «колесо – рельс» складываются на сортировочных горках и при вписывании товарного подвижного состава в криволинейные участки пути малого радиуса с отличным от нуля непогашенным ускорением, обусловленным пониженной его скоростью движения по сравнению с нормативной. В результате такого движения подвижного состава под действием потенциальных сил гребни колесных пар долговременно контактируют с боковой гранью головки внутреннего рельса. Значительные нагрузки в сочетании со значительными скоростями скольжения приводят к повышению температуры в контактной области колеса с рельсом (ее значение может быть сопоставимо со значением температуры плавления материала колеса), что способствует изменению физико-механических свойств фрикционных пар и неблагоприятно сказывается на стабильности динамических характеристик. Возникающие при движении железнодорожного вагона динамические силы являются следствием колебательных и других видов неравномерного движения инерционных масс, составляющих рассматриваемую механическую систему [1] и соединенных между собой упругодиссипативными связями. Математическое моделирование такой системы [2] всегда осуществляется с учетом ряда допущений, что может приводить к неадекватным результатам моделирования, особенно, если это касается триботермодинамики.

Моделирование триботермодинамики с учетом допущений. В качестве примера реализации динамического мониторинга рассмотрим грузовой вагон и его подсистему «колесо – рельс» для идентификации его *триботермодинамики*. Выполним расчет максимальной температуры в зоне трения колеса грузового вагона с рельсом при роспуске вагонов с сортировочной горки с башмачным торможением по известной методике [3]:

$$\Theta_{\max} = \Theta_V + \Theta_{\text{пов}} + \Theta_{\text{всп}}, \tag{1}$$

где $\Theta_{\max}$ – суммарная температура в контакте, °С; Θ_V – объемная температура, °С; $\Theta_{\text{пов}}$ – поверхностная температура, °С; $\Theta_{\text{всп}}$ – температура вспышки, °С.

Объемная температура определяется по формуле:

$$\Theta_V = \frac{(1-\alpha_{\text{т}})W_{\text{т}}}{S\gamma c b t_{\text{т}}}, \tag{2}$$

где $\alpha_{\text{т}}$ – коэффициент распределения тепловых потоков между элементами пары трения; $W_{\text{т}}$ – полная работа трения за время торможения, Дж; S – номинальная площадь контакта, м^2; γ – плотность материала (7800 кг/м^3); c – удельная теплоемкость (503 Дж/(кг·град)); b – толщина рассматриваемого элемента пары трения, м; $t_{\text{т}}$ – время торможения, с.

Для расчета номинальной площади контакта воспользуемся формулой для случая контакта двух цилиндров с параллельными осями. Допустим, что площадь контакта имеет форму прямо-

угольника со сторонами $l \times b$. Здесь l – ширина горизонтального участка рельса (49 мм), b – длина, определяемая как

$$b = 1,522\sqrt{\frac{P}{lE}\bigg/\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)},$$

где P – статическая нагрузка вагона на рельс (133,5 кН); E – модуль Юнга ($2,1 \cdot 10^{11}$ Па); R_1 – радиус колеса вагона (0,475 м); R_2 – радиус рельса (∞, м).

Тогда b=3,78 мм, а номинальная площадь контакта S=185,14 мм^2. Определим полную работу сил трения за время торможения

$$W_{\text{т}} = F \cdot \Delta l = 24965 \cdot 12 = 299580 \text{ Дж},$$

где Δl – расстояние между противоползунными конструкциями ППС-12Д, предназначенными для предотвращения образования ползунов колесных пар; F – равнодействующая сила, действующая на колесо вагона при движении с сортировочной горки:

$$F = mg\sin\alpha - fmg\cos\alpha .$$

Здесь m – распределенная масса вагона, приходящаяся на одно колесо (13,35 т); α – угол наклона горки по отношению к горизонту; f – коэффициент трения (0,24); g – ускорение свободного падения.

Определим коэффициент распределения тепловых потоков:

$$\left(1 - \alpha_{\text{т}}\right) = \frac{1}{1 + \dfrac{b_2 c_2}{b_1 c_1}\sqrt{\dfrac{a_2}{a_1}}} = \frac{1}{1 + \dfrac{0,95}{0,18}} = 0,16,$$

где a_1, a_2 – коэффициенты температуропроводности колеса и рельса (так как физические свойства колеса и рельса приблизительно равны, то $a_1 \approx a_2$=$17,65 \cdot 10^{-6}$ град·м^2/с); b_1 – размер пары трения в направлении теплового потока (высота рельса 180 мм); b_2 – диаметр колеса (950 мм); c_1 и c_2 – удельная теплоемкость колеса и рельса.

После нахождения всех параметров, объемная температура [см. формулу (2)] составит:

$$\Theta_V = \frac{0,16 \cdot 299580}{185,14 \cdot 10^{-6} \cdot 7800 \cdot 503 \cdot 0,95 \cdot 4,3} = 16,15 \text{ °C}.$$

Определим значение средней поверхностной температуры:

$$\Theta_{\text{пов}} = \frac{\left(1 - \alpha_{\text{т}}\right) W_{\text{т}} b_{\text{э}}}{\lambda t_{\text{т}} S}\left(\frac{1}{3}\tau_N + \text{Fo}\tau_W\right), \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности (57,7 Вт/(м·град)); S – номинальная площадь поверхности трения, м^2; τ_N и τ_W – безразмерные параметры работы и мощности трения, изменяющиеся по закону торможения вагона $\tau_N = \left(0,5\tau\right)^2 / 3$, $\tau_W = \left(0,5\tau\right)^3$, τ – безразмерный коэффициент времени торможения, $\tau = t / t_{\text{т}}$; t – время трения; Fo – число Фурье, значение которого зависит от эффективной и действительной толщины элементов пары трения: если $b \le b_{\text{э}}$, то $\text{Fo} = \dfrac{at_{\text{т}}}{b^2}$, а если $b > b_{\text{э}}$, то $\text{Fo} = 1/3$; $b_{\text{э}}$ – эффективная толщина материала, участвующего в теплопоглощении, которую можно вычислить согласно выражению:

$$b_{\text{э}} = 1,73\sqrt{at_{\text{т}}} = 1,73\sqrt{17,65 \cdot 10^{-6} \cdot 4,3} = 0,015 \text{ м}.$$

После нахождения всех параметров, выражение (3) для поверхностной температуры колеса при трении примет вид:

$$\Theta_{\text{пов}} = \frac{0,16 \cdot 299580 \cdot 0,015}{57,7 \cdot 4,3 \cdot 185,14 \cdot 10^{-6} \cdot 3}\left(\tau_N + \tau_W\right) = 5217\left(\tau_N + \tau_W\right).$$

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Расчетные величины, определяющие поверхностную температуру

$\tau = t / t_т$	τ_N	τ_W	$\Theta_{пов}$	Путь трения Δl, м
0	0	0	0	0
0,1	0,000833	0,000125	7,43	1,2
0,2	0,0033	0,001	23,6	2,4
0,3	0,0075	0,003375	58	3,6
0,4	0,013	0,008	111,98	4,8
0,5	0,0208	0,015625	194,4	6,0
0,6	0,03	0,027	303,95	7,2
0,7	0,0408	0,0429	446,5	8,4
0,8	0,0533	0,064	625,7	9,6
0,9	0,0675	0,0911	845,75	10,8
1	0,0833	0,125	1110,78	12,0

Получено, что поверхностная температура уже тогда достигает высоких значений, т.е. температуры плавления материала, когда большая часть активных микрообъемов на фактической площади касания подвержена не упругим (по закону Гука), а пластическим деформациям. В данном случае расчет температуры вспышки не приводится, так как он даст еще большие значения. По нашему мнению, в выражении (1) должны указываться не абсолютные значения температур, а их приращения как функции градиента температуры. Кроме того, указанный способ мониторинга триботермодинамики применять невозможно, так как он не учитывает взаимосвязь и взаимовлияние динамической системы, подсистемы фрикционного контакта и условий окружающей среды.

Гипотеза экспериментальной триботермодинамики. Нами предложен *способ уточнения выражения* (1), позволяющий проверить экспериментальную модель триботермодинамики фрикционной мобильной системы, в частности железнодорожного вагона, с применением *метода физико-математического моделирования* [4]. Процессы в объекте исследования и модели при динамическом подобии должны быть тождественны и описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями [4, 5]. В качестве условия динамического подобия механической подсистемы вагона принимаем равенство частот колебаний модели и объекта исследования.

Основным критерием достоверности модельного эксперимента следует считать реализацию в условиях модели *одинакового* с натурным образцом *вида изнашивания поверхностных слоев и интенсивности износа контактирующих тел*. Для реализации условий динамического подобия процессов на поверхности фрикционного контакта при трении необходимо выполнить следующее [4]:

$$C_k = C_n = C_T = C_h = C_r = C_A = C_{Vск} = C_q = 1,$$

$$C_S = C_F = C_N = C_m = C_C = C_\beta = C_l^2, \qquad C_J = C_C C_l = C_l^3,$$

где масштабы подобия: C_k, C_n – собственных и затухающих частот колебаний соответственно; C_T – периода колебаний; C_h – высоты микрообъема; C_r – радиуса закругления микрообъема; C_A – амплитуды деформации микрообъема; $C_{Vск}$ – скорости относительного скольжения; C_q – контактного давления; C_S – фактической площади касания; C_F – силы трения; C_N – нормальной нагрузки; C_m – массы микрообъема; C_C – жесткости микрообъема; C_β – эквивалентного коэффициента демпфирования; C_l – геометрических размеров; C_J – момента инерции микрообъема.

Фрикционный узел трения «колесо – рельс» является составной частью фрикционной мобильной системы «подвижной состав – путь». Масса колеса m_1 и приведенная масса рельса m_2 совершают сложное взаимное перемещение и являются составными частями механической системы (рис.1).

Теоретический расчет или экспериментальное исследование прямыми методами теплового состояния *А-Б* и *Б-В* области на сегодняшний день являются проблемными, так как определяются текущими значениями шероховатостей контактирующих поверхностей при их взаимном смещении, значением фактической площади касания, которые меняются на порядок и более при относительном скольжении трущихся тел [6] и определяют триботехнические характеристики фрикционных систем. Значения объемных температур в *В-Г* области, т.е. ее градиентное изменение, можно определить на базе существующих математических моделей.

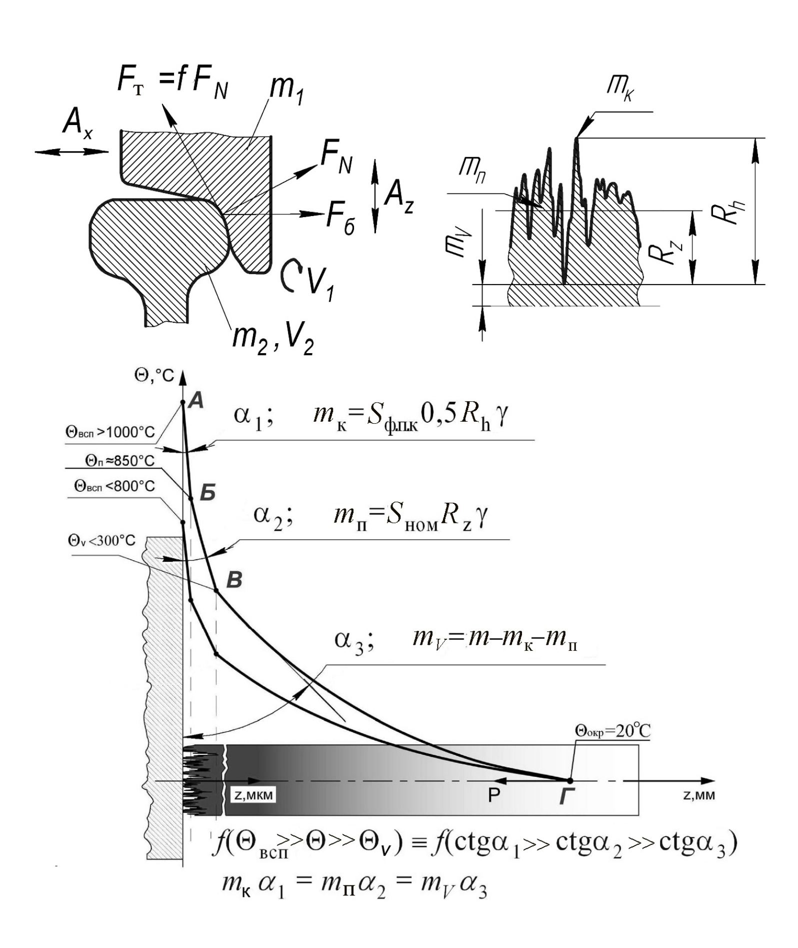


Рис.1. Модельное представление фрикционной системы «колесо – рельс»: F_N – нагрузка; $F_т$ – сила трения; f – коэффициент трения; m_1 – масса колеса; m_2 – приведенная масса рельса; Θ – температура; $\Theta_{всп}$ – максимальная температура, реализуемая на наибольшей высоте R_h; m_V – объемная масса; $m_п$ – поверхностная масса; $m_к$ – масса контактирующих микронеровностей поверхности; R_z – высота неровности профиля по десяти точкам; R_h – наибольшая высота профиля; $S_{ном}$ – номинальная площадь поверхности; $S_{ф.п.к}$ – фактическая площадь касания поверхностей трения; γ – плотность материала; P – усилие; z – сближение поверхностей трения; A_x, A_z – перемещение колеса относительно рельса в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно

Выдвигается гипотеза, что максимальная температура в контакте $\Theta_{всп}$ [см. формулу (1)] не складывается из трех отдельных температур (объемной, поверхностной и температуры вспышки), как указывается в [3], а является одной температурой, имеющей три зоны состояния [7]:

– область *А–Б* асимптотического изменения объемной температуры от максимальных значений (температура вспышки) до максимальной поверхностной, значения данной температуры могут достигать и превышать температуру плавления контактирующих материалов;

– область *Б–В* перехода объемной температуры от максимальной поверхностной к максимальной объемной в сплошном теле;

– область *В–Г* асимптотического перехода от максимальной температуры в сплошном теле до ее низших значений.

В качестве реализации гипотезы триботермодинамики принимается постоянная величина произведений масс активных микрообъемов на показатель асимптоты градиента объемной температуры, т.е.

$$m_к \alpha_1 = m_п \alpha_2 = m_V \alpha_3 . \quad (4)$$

Для подтверждения выдвинутой гипотезы, увеличения достоверности и адекватности экспериментального определения значений физических параметров, установления законов статистической повторяемости результатов, имеющих вероятностную природу, проведения математического планирования эксперимента, установления рациональных значений параметров и переноса результатов испытаний на реальный объект исследования методом анализа размерностей выводятся константы подобия физических величин, существенно влияющих на триботермодинамику трибосистемы «колесо – рельс». Функциональная зависимость поверхностной температуры Θ_S от физических параметров имеет вид критериального уравнения подобия [5]:

$$\Theta_S = f\left(\begin{array}{l} \frac{kl}{V}, \frac{ql^2}{N}, \frac{\Delta\Theta l}{\Theta}, \frac{tV}{l}, \frac{L}{l}, \frac{S}{l^2}, \frac{F}{N}, \frac{mV^2}{Nl}, \frac{\beta V}{N}, \frac{\rho V^2 l^2}{N}, \frac{W}{Nl}, \\ \frac{V_N l}{NV}, \frac{S_1 l_2^2}{l_1^2 S_2}, \frac{I_о l^2}{NV}, \frac{\sigma\Theta l^2}{NV}, \frac{\lambda\Theta l}{NV}, \frac{\gamma}{NV}, \frac{UV^2 l^2}{N}, \frac{A}{l}, \frac{h}{l} \end{array} \right),$$

где *базисные факторы*: Θ – максимальная температура на фактической площади касания, °С; N – нормальная нагрузка колеса железнодорожного вагона на рельс, Н; V – скорость качения, м/с; l – геометрический масштаб, м; *граничные условия*; k – частота собственных колебаний, с$^{-1}$; q – контактное давление, Па; $\Delta\Theta$ – градиент температуры, К/м; *прочие факторы*: t – время трения, с; L –путь трения, м; S – фактическая площадь касания, м^2; F – сила трения, Н; m – масса колеса, кг; β – коэффициент демпфирования, Н·с/м; ρ – удельный вес материала, кг/м^3; W – работа сил трения, Дж; V_N – скорость нарастания нагрузки, Н/с; $k_{вз}$ – коэффициент взаимного перекрытия колеса и рельса; $I_о$ – интенсивность охлаждения колеса, Вт/м^2; σ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); γ – тепловой поток, Дж/с; U – износ весовой, кг/м^3; A – амплитуда деформации связей, м; h – шероховатость поверхности Rz, м.

Выполненная проверка по стандартным критериям гомохронности, Ньютона, Фруда, Био получила удовлетворительную сходимость полученных критериев подобия. Для подтверждения соотношения (4) составлен *критерий экспериментальной триботермодинамики*, позволяющий экспериментально установить значение температуры вспышки $\Theta_{всп}$ активных микрообъемов:

$$\pi_\Theta = \Theta \cdot \frac{qV_{ск}\sigma W \rho S h}{\alpha m \beta k I_о \gamma} = \text{idem},$$

где α – показатель асимптоты градиента объемной температуры; m – масса контактная $m_к$, поверхностная $m_п$, либо объемная m_V, кг (см. рис.1).

В целях прогнозирования образования ползунов на колесных парах, обусловленных термоповреждением активных микрообъемов колес при длительном вписывании в криволинейные участки пути или на сортировочных горках, были выполнены экспериментальные исследования по триботермодинамике. Эксплуатационные испытания (ВНИКТИ, 2007 г.) прохождения тягового локомотива в кривой малого радиуса по рельсам с установленной разомкнутой термопарой позволили установить поверхностную температуру контакта 580 и 637 °С [8]. Для подтверждения полученных значений температуры и выдвинутой ранее гипотезы триботермодинамической модели фрикционного взаимодействия предлагается способ идентификации по трибоспектральным оценкам [9]. Исходными данными для идентификации выступали поверхностная или объемная температура $\Theta(t+\tau)$, регистрируемая термопарой, момент трения $M(t)$ и нормальная нагрузка $N(t)$, снимаемые с установки трения СМТ-1 при проведении эксперимента по схеме «тормозная колодка – ролик». Внутри тормозной колодки была установлена хромель-алюминиевая термопара на заданном расстоянии от фактической площади касания. Начальный этап идентификации максимальных контактных температур и возможного термоповреждения заключается в использовании взаимной корреляционной функции (ВКФ) [10] как функции временного сдвига τ

$$B_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} M(t)\Theta(t+\tau)\,dt\,.$$

Анализ временных коррелограмм (рис.2) для всей реализации эксперимента позволил установить момент достижения корреляционной функции 0,8 и более, что может свидетельствовать о возможных термоповреждениях поверхностных слоев контакта.

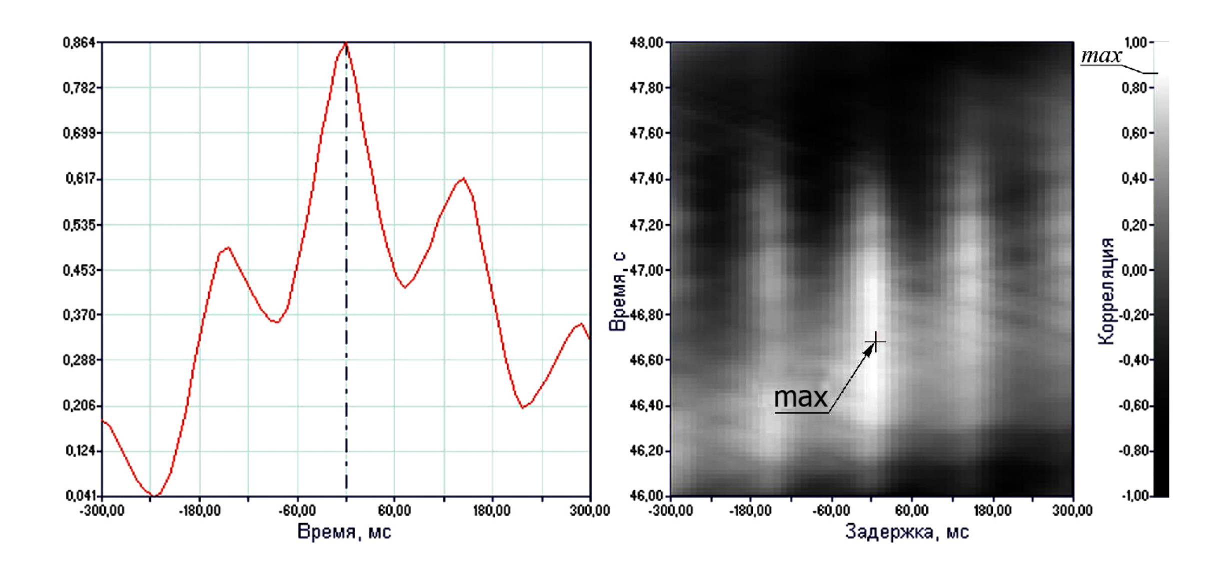


Рис.2. Коррелограмма изменения взаимной корреляционной функции температуры и момента трения

Определив временной диапазон анализа, далее выполняли анализ интегральных оценок степени диссипации по диапазонам частот, вычисленных по амплитудо-фазочастотным характеристикам [9], который показал, что потеря стабильности трибосистемы происходит с задержкой возрастания сил трения 5, причем градиенты изменения диссипации 3 и потери стабильности 4 идентичны (рис.3). В частотном диапазоне 20-30 Гц фиксируются моменты формирования температуры вспышки 11, а максимальное значение корреляционной функции отстает на величину периода 12.

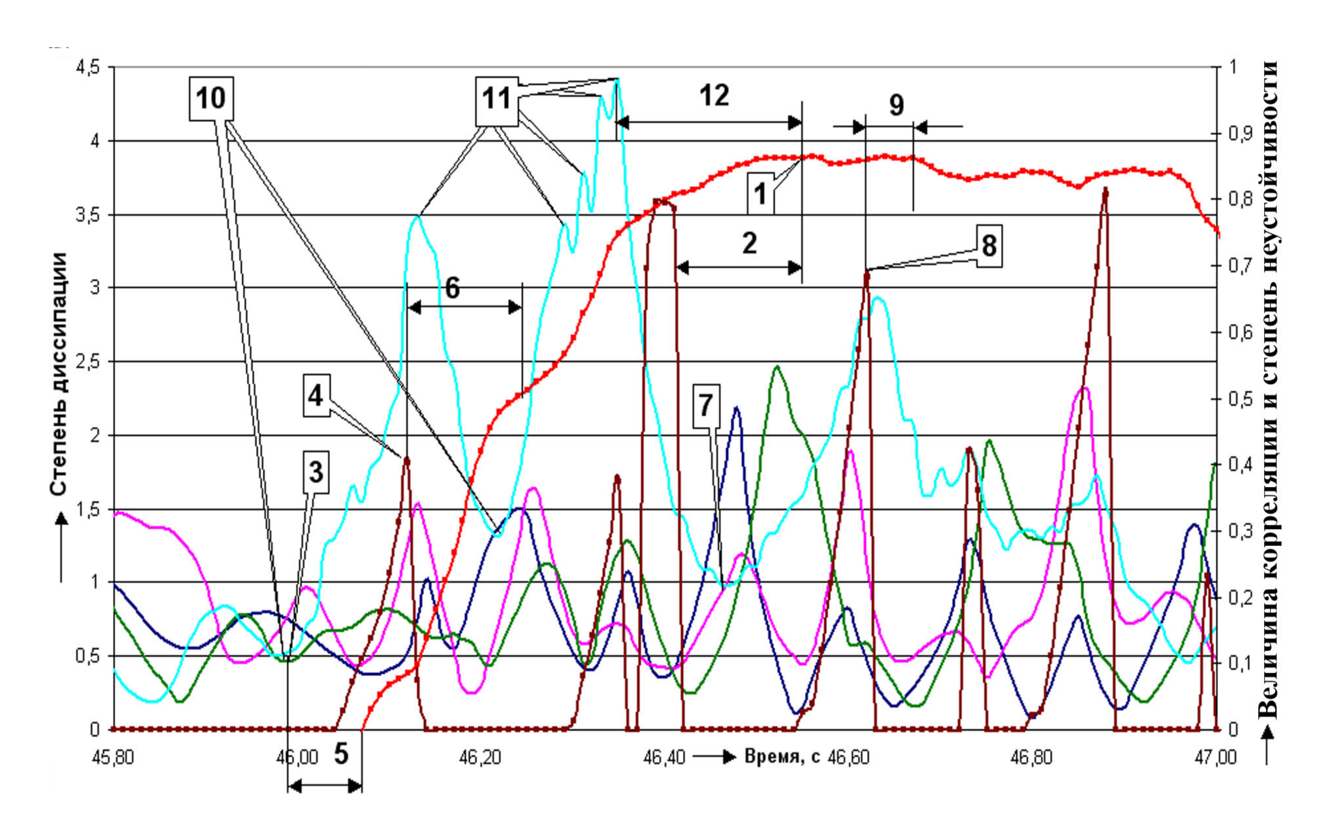


Рис.3. Соответствие интегральных оценок величины диссипации амплитудо-фазочастотных характеристик по диапазонам частот триботермодинамики фрикционного контакта *термическому схватыванию* [11]: 1 – максимум ВКФ температуры и момента трения; 2, 6, 9 – задержка распространения теплового потока; 3, 7, 10 – момент времени зарождения термоповреждения; 4, 8 – максимум потери стабильности движения; 5 – задержка распространения ВКФ; 11 – моменты времени теплоотдачи

Анализ всех реализаций интегральных показателей диссипации трибосистемы показал, что наблюдаемое повышение величины диссипации трибосистемы с последующим развитием потери стабильности и повышения значения корреляционной функции характерно не всегда: после прекращения периода динамической нестабильности, возрастания диссипации трибосистемы и увеличения количества моментов потери стабильности, наблюдается возрастание корреляционной функции, а задержка распространения теплового потока достигает одной секунды (рис.4).

Оценкой формирования равновесной шероховатости и развития термоповреждений может выступать значение мощности трения:

$$N = PV = I_Q(\omega, t)\omega_{\text{ср}} n(t)\frac{2\pi R}{60},$$

где P – сила трения, Н; V – скорость относительного скольжения, м/с; $I_Q(\omega, t)$ – интегральная оценка диссипации, вычисленная по амплитудо-фазочастотным характеристикам на заданных частотных интервалах со средней частотой $\omega_{\text{ср}}$; n – частота вращения ролика; R – радиус ролика.

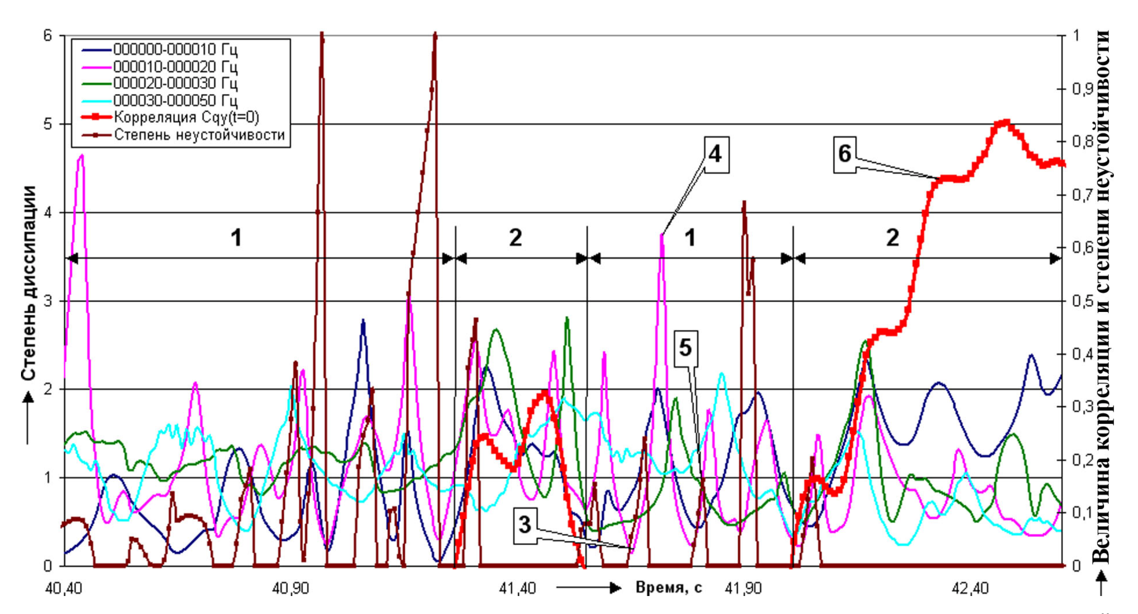


Рис.4. Соответствие интегральных оценок степени диссипации по диапазонам частот, показателя относительной нестабильности трибосистемы и взаимной корреляционной функции температуры и момента трения *атермическому схватыванию* [11]: 1 – временной интервал разрушения равновесной шероховатости, увеличения инерционных и диссипативных сил и потери стабильности, образования локальных мостиков схватывания; 2 – формирование новой равновесной шероховатости, повышение ВКФ температуры и момента трения; 3 – момент времени «зарождения» локальных мостиков схватывания; 4 – момент времени, при котором наблюдается «температура вспышки»; 5 – потеря стабильности по амплитуде или фазе; 6 – достижение ВКФ температуры и момента трения максимального значения, которое запаздывает на временной интервал до 1 с

На диаграммах зависимости мощности трения от объемной температуры фрикционного контакта на разных частотных диапазонах (рис.5) видно, что нормальное распределение мощности трения характерно установлению равновесной шероховатости, отсутствию термоповреждений, а экспоненциальное распределение – происходящим на фрикционном контакте термоповреждениям с выделением тепла.

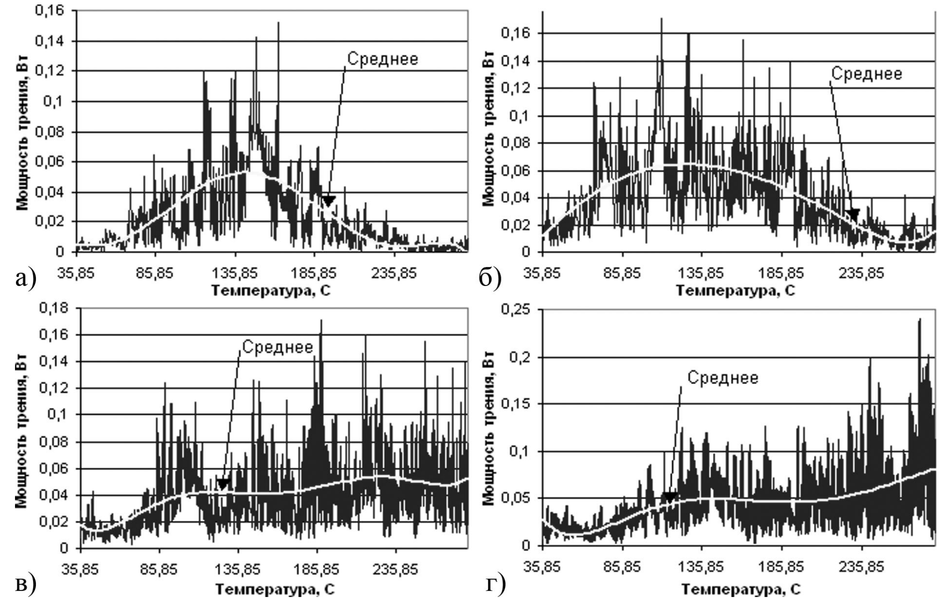


Рис. 5. Оценка мощности сил трения по диапазонам частот как функция объемной температуры фрикционного контакта со средней частотой $\omega_{ср}$:
а – 5 Гц; *б* – 15 Гц; *в* – 25 Гц; *г* – 40 Гц

В целях определения максимальных значений «температуры вспышки» на фактической площади касания в соответствии с выдвинутой гипотезой экспериментальной триботермодинамики, были установлены в тормозной колодке уже две термопары на расстоянии 2 и 5 мм от фактической площади касания с моделью колеса и зафиксированы две объемные температуры Θ_2 и Θ_3. Результаты экспериментального определения поверхностной температуры на установке трения СМТ-1 представлены на рис.6.

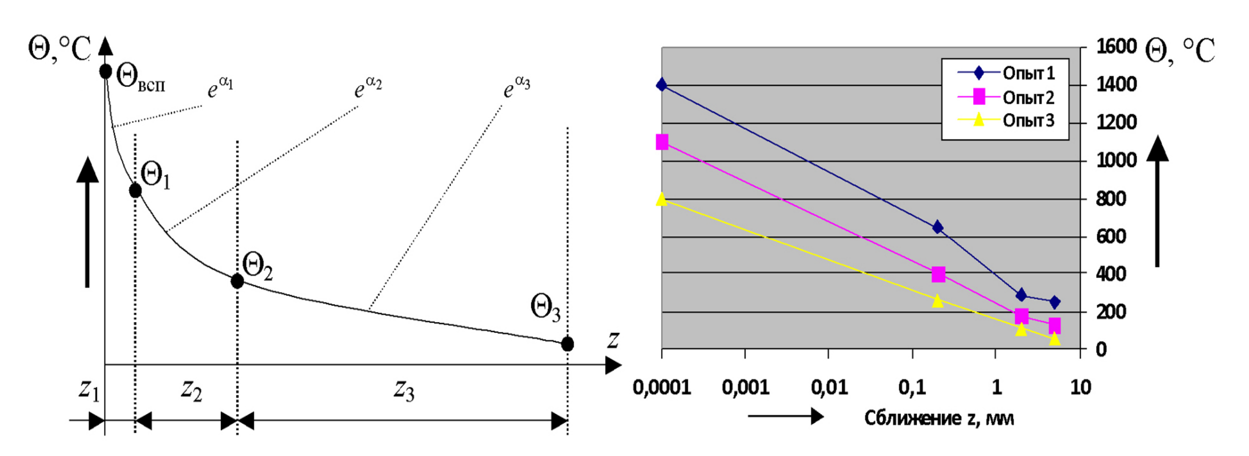


Рис.6. Экспериментальная температура активных микрообъемов как функция сближения при скорости относительного скольжения: опыт 1 – 2,2%; опыт 2 – 1,5%; опыт 3 – 0,5% скорости движения

Для расчета температуры вспышки в соответствии с основными законами колебаний механических систем используем логарифмический декремент затухания [12]. Расчет выполняем следующим образом:

1) темп затухания $q_3 = \Theta_3 / \Theta_2$, где Θ_3 и Θ_2 – значения температуры, измеренные термопарами на разном удалении от фактической площади касания;

2) зная логарифмический декремент $\ln q_3 = \alpha_3 z_3$, где z_3, мкм – расстояние между установленными термопарами, находим показатель асимптоты затухания $\alpha_3 = \ln q_3 / z_3$;

3) согласно выдвинутой гипотезе экспериментальной триботермодинамики находим показатель асимптоты на номинальной площади касания $\alpha_2 = \alpha_3 \cdot m_V / m_п$, где m_V – объемная масса; $m_п$ – поверхностная масса (см. рис.1);

4) вычисляем логарифмический декремент затухания на номинальной площади касания $\ln q_2 = \alpha_2 z_2$, где z_2 – сближение поверхностей трения на номинальной площади касания;

5) исходя из выражения темпа затухания $q_2 = e^{\alpha_2 z_2} = \Theta_2 / \Theta_1$ находим поверхностную температуру $\Theta_1 = \Theta_2 / e^{\alpha_2 z_2}$.

Зная величину сближения на фактической площади касания z_1, аналогичным образом устанавливаем значение температуры вспышки $\Theta_{всп}$, результаты расчетов которых представлены на рис.6. Последующие вычисления температуры вспышки $\Theta_{всп}$ по кривой опорной поверхности и предложенному алгоритму равенства произведений масс активных микрообъемов на показатель асимптоты подтверждают результаты эксплуатационных исследований поверхностной температуры, выполненных учеными ВНИКТИ [8]. С учетом предложенной методики триботермодинамики разработанная противоползунная конструкция ППС-12Д получила удовлетворительные эксплуатационные характеристики и рекомендуется для внедрения на всей сети ОАО РЖД.

Заключение. В результате серии выполненных экспериментальных исследований триботермодинамики по анализу амплитудо-фазочастотных характеристик, их интегральных показателей степени диссипации по диапазонам частот и степени нестабильности было выявлено следующее:

– возрастание интегральных оценок степени диссипации более чем на величину полутора – трехкратного среднеквадратического отклонения относительно математического ожидания, вычисленного за продолжительный период времени, последующая регистрация потери ста-

бильности по амплитуде или фазе 4 (см. рис.3) и возрастание взаимной корреляционной функции 6 при временном сдвиге, равном нулю, являются факторами, идентифицирующими возрастание поверхностной температуры активных микрообъемов соприкасающихся тел, образование местных мостиков сварки, флуктуации интегральных оценок диссипации 11, что характерно для *термического схватывания поверхностей трения*;

– теплоотдача поверхностей трения характеризуется падением значений интегральных оценок степени диссипации и формированием новой равновесной шероховатости;

– при *атермическом схватывании* (см. рис.4) было установлено, что локальные металлические связи поверхностей трения обусловливают флуктуации интегральных оценок степени диссипации относительно их математического ожидания и сопровождаются потерей устойчивости по амплитуде или фазе амплитудо-фазочастотных характеристик 1, но не вызывают возрастание взаимной корреляционной функции температуры и момента трения; возрастание же последней характеристики 2 фиксируется после установления равновесной шероховатости и прекращении периода динамической нестабильности, т.е. задержка распространения теплового потока достигает одной и более секунды;

– использование *гипотезы экспериментальной триботермодинамики* позволяет фиксировать максимальные значения температур на фактической площади касания в текущем масштабе времени;

– использование методик трибоспектральной идентификации и физико-математического моделирования позволяет установить идентификационные характеристики термоповреждений поверхностей трения подсистем «колесо – рельс», «колесо – тормозные колодки», что с использованием вибродиагностического комплекса по мониторингу термотрибодинамики позволит предотвращать такие негативные явления, как образование ползунов на колесных парах, разрушение тормозных колодок и т.д.

Библиографический список

1. Вершинский С.В. Динамика вагона: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов; под ред. С.В. Вершинского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

2. Шамберов В.Н. Обзор аналитических исследований влияния сухого трения в элементах автоматических систем на их устойчивость / В.Н. Шамберов // Сб. тр. 9-й сессии междунар. науч. школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». – СПб.: ИПМаш РАН, 2009.

3. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении / А.В. Чичинадзе; под ред. Л.В. Кудрявцева. – М.: Наука, 1967. – 231 с.

4. Пат. 2343450 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/56. Способ испытаний узлов трения / В.В. Шаповалов, А.Л. Озябкин [и др.]. – №2006121024/28 (022825); заявл. 10.01.2009; опубл. 24.04.2008.

5. Браун Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982.

6. Шаповалов В.В. Проблемы транспортной триботехники: физико-математическое моделирование мобильных фрикционных систем. Ч.2 / В.В. Шаповалов // Трение и износ. – 2009. – №12. – С.9-17.

7. Шаповалов В.В. Проблемы транспортной триботехники: физико-математическое моделирование мобильных фрикционных систем. Ч.1 / В.В. Шаповалов // Трение и износ. – 2009. – №10 – С.3-11.

8. Оптимизация ширины рельсовой колеи. Результаты испытаний по определению температуры в зонах контакта колеса с рельсом: отчет о НИР (заключ.): 19.5.002р / В.В. Березин, Ю.А. Панин; рук. А.В. Спиров. – Коломна: ВНИКТИ, 2007. – Инв. №6741.

9. Озябкин А.Л. Выбор информационных каналов для динамического мониторинга аномальных термодинамических процессов в контакте «колесо – рельс» / А.Л. Озябкин, А.А. Александров // Вестн. РГУПС. – 2010. – №4.

10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

11. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев: Тэхніка, 1970. – 396 с.
12. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.

Материал поступил в редакцию 21.04.2011.

References

1. Vershinskij S.V. Dinamika vagona: ucheb. dlya vuzov zh.-d. transp. / S.V. Vershinskij, V.N. Danilov, V.D. Xusidov; pod red. S.V. Vershinskogo. – 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Transport, 1991. – 360 s. – In Russian.
2. Shamberov V.N. Obzor analiticheskix issledovanij vliyaniya suxogo treniya v e`lementax avtomaticheskix sistem na ix ustojchivost` / V.N. Shamberov // Sb. tr. 9-j sessii mezhdunar. nauch. shkoly` «Fundamental`ny`e i prikladny`e problemy` nadyozhnosti i diagnostiki mashin i mexanizmov». – SPb.: IPMash RAN, 2009. – In Russian.
3. Chichinadze A.V. Raschyot i issledovanie vneshnego treniya pri tormozhenii / A.V. Chichinadze; pod red. L.V. Kudryavceva. – M.: Nauka, 1967. – 231 s. – In Russian.
4. Pat. 2343450 Rossijskaya Federaciya, MPK G 01 N 3/56. Sposob ispy`tanij uzlov treniya / V.V. Shapovalov, A.L. Ozyabkin [i dr.]. – #2006121024/28 (022825); zayavl. 10.01.2009; opubl. 24.04.2008. – In Russian.
5. Braun E`.D. Modelirovanie treniya i iznashivaniya v mashinax / E`.D. Braun, Yu.A. Evdokimov, A.V. Chichinadze. – M.: Mashinostroenie, 1982. – In Russian.
6. Shapovalov V.V. Problemy` transportnoj tribotexniki: fiziko-matematicheskoe modelirovanie mobil`ny`x frikcionny`x sistem. Ch.2 / V.V. Shapovalov // Trenie i iznos. – 2009. – #12. – S.9-17. – In Russian.
7. Shapovalov V.V. Problemy` transportnoj tribotexniki: fiziko-matematicheskoe modelirovanie mobil`ny`x frikcionny`x sistem. Ch.1 / V.V. Shapovalov // Trenie i iznos. – 2009. – #10 – S.3-11. – In Russian.
8. Optimizaciya shiriny` rel`sovoj kolei. Rezul`taty` ispy`tanij po opredeleniyu temperatury` v zonax kontakta kolesa s rel`som: otchyot o NIR (zaklyuch.): 19.5.002r. / V.V. Berezin, Yu.A. Panin; ruk. A.V. Spirov. – Kolomna: VNIKTI, 2007. – Inv. #6741. – In Russian.
9. Ozyabkin A.L. Vy`bor informacionny`x kanalov dlya dinamicheskogo monitoringa anomal`ny`x termodinamicheskix processov v kontakte «koleso – rel`s» / A.L. Ozyabkin, A.A. Aleksandrov // Vestn. RGUPS. – 2010. – #4. – In Russian.
10. Sergienko A.B. Cifrovaya obrabotka signalov / A.B. Sergienko. – SPb.: Piter, 2003. – 604 s. – In Russian.
11. Kosteczkij B.I. Trenie, smazka i iznos v mashinax / B.I. Kosteczkij. – Kiev: Texnika, 1970. – 396 s. – In Russian.
12. Biderman V.L. Teoriya mexanicheskix kolebanij / V.L. Biderman. – M.: Vy`ssh. shk., 1980. – 408 s. – In Russian.

DYNAMIC MONITORING OF FRICTIONAL MOBILE SYSTEMS TRIBOTHERMODYNAMICS

A.L. OZYABKIN
(Rostov State Transport University)

A hypothesis of experimental tribothermodynamics had been suggested and proved. The hypothesis permits to define flash temperature on the true contact area as a practical example.
Keywords: *physico-mathematical modeling, tribospectral assessment, flash temperature, gripping, face and bulk temperatures.*

УДК 681.3.681.5

ПЕРЕСТАНОВОЧНЫЙ АЛГОРИТМ БИЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ОДНОРОДНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

Р.А. НЕЙДОРФ
(Донской государственный технический университет),
А.В. ФИЛИППОВ, З.Х. ЯГУБОВ
(Ухтинский государственный технический университет)

Разработан эффективный алгоритм построения оптимальных решений однородных распределительных задач, который назван алгоритмом биэкстремального решения, поскольку позволяет находить распределение, доставляющее экстремум одновременно двум популярным оценкам качества распределения: критерию равномерности распределения и минимаксному критерию. Изложена сущность его работы, заключающаяся в формализующей перестройке структуры загрузочной матрицы, полученной алгоритмом Романовского, с дальнейшей формализованной перестановкой заданий между их исполнителями. Приведен пример пошагового решения конкретной задачи.
Ключевые слова: *алгоритм, теория расписаний, распределительная задача, однородная система, критерий оптимизации, биэкстремальное решение, перестановочное правило.*

Введение. Двадцатый век назвали «веком очередей», что породило появление и развитие научных дисциплин, изучающих законы планирования работ, процессов, действий. В двадцать первом веке от науки о планировании требуются значительно более серьезные, сложные и эффективные решения. Это вполне объяснимо. Планетарный размах совместных действий социумов и коллективов вызывает необходимость жестко планировать их согласованные параллельно-последовательные действия во всех сферах жизни человека: производственной, экономической, социальной, военной и т.д. Это обстоятельство делает актуальным объектом исследований фундамент науки о планировании – классическую теорию расписаний (КТР), ориентированную на анализ закономерностей распределения условных абстрактных «заданий» между столь же условными и абстрактными «исполнителями [1].

Хотя распределительная задача (РЗ) концептуально проста в своей постановке и уже существует значительное количество разработанных методов ее решения, а также производственных, экономических, социальных, боевых и других примеров, их иллюстрирующих, исследование и разработка методов решения задач КТР сохраняют свою актуальность. Для КТР выделяют два типа задач, различающихся постановкой, областью приложения, способами решения: однородные РЗ (ОРЗ) и неоднородные – НРЗ. Постановка ОРЗ представляет собой существенно упрощенную форму любой РЗ. Поэтому именно она составляет фундамент самой КТР [1, 2]. Несмотря на внешнюю простоту, ОРЗ является NP-полной задачей с показательным ростом сложности при увеличении размерности [1-3]. Популярными и перспективными направлениями исследований в области ОРЗ являются следующие постановки задачи:

– повышение ресурсной (чаще всего, временной) эффективности алгоритмов точного решения оптимизационных РЗ;

– повышение точности работы алгоритмов приближенного решения, привлекательных высокой скоростью решения РЗ.

Указанные выше два направления исследования РЗ интенсивно развиваются [4-7]. Однако исследования показали, что для рассматриваемой области характерна внешне неочевидная, но весьма глубокая и обещающая серьезные перспективы ниша, скрывающая внутренние возможности РЗ, связанные с ее многоэкстремальностью [4]. Этот эффект порождает возможность ставить

и решать РЗ, удовлетворяющие одновременно двум, а возможно и большему количеству экстремальных требований.

Разумеется, при этом лишь один из критериев будет иметь абсолютный экстремум, а остальные критерии будут экстремальны относительно, хотя возможны случаи совпадения относительного экстремума с абсолютным.

Поэтому можно сформулировать третье направление, которое пока не изучено, но заслуживает самого пристального внимания и выбрано объектом изучения и формализации в данной работе. Это направление может быть сформулировано как многоэкстремальная оптимизация решения РЗ, и связывается в этой статье с решением минимаксной РЗ при введении в рассмотрение второго критерия оптимизации, оценивающего равномерность распределения заданий между исполнителями.

Постановка задачи. В связи со сформулированной выше проблемой ставится задача повышения эффективности решения ОРЗ. Платформой для создания эффективного алгоритмического инструмента является свойство многоэкстремальности решений РЗ и селективный подход, разработанный для улучшения структуры решений ОРЗ, полученных по известному алгоритму Романовского (АР) [3]. Алгоритм селективного подхода весьма универсален и ранее [5, 7] был использован как эквивалентно-селективный, предназначенный для преобразования уже полученных оптимальных распределительных решений с одновременным их улучшением по выбранному дополнительному критерию, но без ухудшения оценки по исходному критерию. Поэтому в исследовании ставится цель окончательной формализации и подробной иллюстрации предложенного Романовским варианта перестановочного алгоритма [3], ориентированного на перестройку произвольного решения ОРЗ, оптимального по минимаксному критерию (ММК). Ввиду многоэкстремальности решения ОРЗ такая перестройка может привести либо к варианту совпадения экстремумов в одном решении, либо к варианту нахождения условного экстремума одного из критериев на фоне сохранения абсолютного экстремума другого.

Для доступного последовательного изложения существа предлагаемого подхода целесообразно кратко охарактеризовать математическое описание и основные свойства однородной исполнительной системы и решаемой для нее ОРЗ.

Математическая модель ОРЗ. Общая математическая модель (ММ) постановки и решения РЗ сформулирована наиболее четко в работе [8]. Построение ее версии применительно к ОРЗ основывается на понятии абстрактной исполнительной системы (ИС), состоящей из m идентичных, параллельно работающих исполнителей, составляющих множество $E=\{E_1,\ldots,E_m\}$. Вторую составляющую ОРЗ образует множество независимых заданий $W=\{w_1,\ldots,w_n\}$, которые необходимо распределить между исполнителями E_j ИС E. Известен ресурс выполнения каждого i-го задания, обозначаемый r_i, и он одинаков для любого j-го исполнителя e_j. Таким образом, n-множеству W сопоставлено n-множество ресурсов $R=\{r_1,\ldots,r_n\}$. Решением ОРЗ является любое множество $D^W=\{W_1,\ldots,W_m\}$, в котором подмножества заданий $W_j=\{w_k \mid w_k\in W\}$ отвечают обязательному свойству замкнутости РЗ, описываемому следующим отношением:

$$\forall j,k\in[1,m]\rightarrow\bigcup_{j=1}^{m}W_j=W;\,W_j\bigcap_{j\neq k}W_k=\varnothing\,.$$

Запланированная вариантом D^W загрузка заданиями каждого исполнителя E_j оценивается ресурсом R_j, определяемым аддитивным выражением $R_j=\sum r_k;\,r_k:w_k\in W_j$. Ресурсы R_j

составлены из множества закрепленных за ними заданий и образуют множества $R_j = \{ r_k | r_k \in R \}$, которые, как и W_j, отвечают обязательному свойству замкнутости:

$$\forall j,k \in [1,m] \to \bigcup_{j=1}^{m} R_j = R : R_j \bigcap_{j \neq k} R_k = \varnothing .$$

Таким образом, каждому решению РЗ в виде конкретного варианта D^W сопоставляется оценочное множество $D^R = \{ R_1, \ldots, R_m \}$. При этом качество распределения заданий по исполнителям оценивается ресурсом выполнения всего множества W и задается некоторым функционалом, дискретными аргументами которого являются ресурсы загрузки исполнителей R_j.

Для оценки решения РЗ D^W формируется функция или функционал $Q\left[D^R \right]$, отражающие требования к свойствам этого решения. Например, максимальная по ресурсу загрузка одного из исполнителей

$$Q^m \left[D^r \right] = \max_R \left\{ R_j \mid j = \overline{1,m} \right\} \quad (1)$$

представляет собой оценку ресурсоемкости решения и считается наиболее эффективной среди функционалов, а если в качестве ресурса выступает время, то выражение (1) является оценкой производительности ИС.

Другой известной и важной оценкой эффективности решения РЗ является выражение следующего вида:

$$Q^e \left[D^r \right] = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} \left(R_j - \overline{R} \right)^2}{m-1}}, \quad \overline{R} = \frac{\sum_{j=1}^{m} R_j}{m}, \quad (2)$$

которое представляет собой СКО загрузок исполнителей от средней загрузки по ИС и служит оценкой равномерности загрузки исполнителей ИС.

Теоретически показано [1], что существует, хотя и конечное, но очень большое количество N возможных вариантов загрузки ИС. Оно зависит от размерности задачи, определяемой двумя параметрами: мощностью ИС – m и мощностью задания – n. Полное количество вариантов загрузки ИС вычисляется по формуле: $N = m^n$. Это и определяет NP-полноту алгоритма перебора вариантов решения, т.е. NP-полноту РЗ.

При любом критерии наилучшим способом конкретизации и обеспечения эффективности решения является оптимизационный подход. Например, от оценки (1) целесообразно задаться условиями минимальности значения в окончательном ее решении. Это порождает ММК оптимизации:

$$Q^{mm} \left[D^r \right] = \min_{E,W} \max_R \left\{ R_j \mid j = \overline{1,m} \right\}. \quad (3)$$

Аналогично минимизация оценки (2) порождает КРЗ

$$Q^{de} \left[D^r \right] = \min_{E,W} Q^e \left[D^r \right]. \quad (4)$$

При совместном использовании выражений (3) и (4) возможны различные варианты оптимизации решения. В условиях наличия такого интересного свойства решений ОРЗ, как многоэкстремальность [4-7], среди решений, экстремальных по ММК, могут оказаться решения, экстремальные по критерию равномерности загрузки (КРЗ). Если же таких вариантов не окажется, всегда существует условный экстремум КРЗ на фоне абсолютного оптимума решения по ММК.

Современные методы решения ОРЗ. Для решения РЗ зарубежными и российскими учеными разработано множество алгоритмов, различающихся как областью приложения, так и эксплуатационными свойствами [1-3]. Главным классификационным отличием этих методов является результат решения. Методы, позволяющие находить абсолютный оптимум решения по критериям (3) или (4), называются *точными*, тогда как методы, не гарантирующие этого свойства, называются *приближенными*.

Применительно к ОРЗ наиболее известным, распространенным и универсальным методом точного решения является АР, описанный и исследованный во многих источниках, например [3, 4]. Методологически АР принадлежит к классу методов «ветвей и границ», которые пусть и не решают проблему NP-полноты, но значительно снижают ресурс решения РЗ по сравнению с алгоритмом прямого перебора. В большинстве случаев АР дает хорошие ресурсные показатели, и позволяет решать задачи довольно высокой размерности. Так, например, приведенное в [5] решение с помощью АР 30 случайно сгенерированных РЗ с параметрами $m=19$; $n=317$; $\min r_i=25$; $\max r_i=75$, дает время решения одной ОРЗ от 3 до 21 с, что вполне приемлемо для большинства приложений.

Таблица 1

Исходный массив заданий

$R=\{r_i \mid i=\overline{1,n}\}$; $n=25$	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	r_i	50	42	55	40	48	48	58	41	38	47	48	48	37	64	60	49	59	44	44	51	51	57	48	36	60

Однако вариант решения ОРЗ с использованием АР является однозначным результатом поданной на его вход последовательности заданий. Случайный характер значений ресурсов этих заданий приводит к самым различным структурным свойствам решения АР при неизменном оптимуме их по ММК. Для проверки жесткости АР относительно связи структуры результата проведен эксперимент с исходной выборкой заданий (табл.1). Эта совокупность обрабатывалась АР при различных способах предварительной обработки массива и начальных условий самого алгоритма. Данный массив вводился на вход алгоритма и в отсортированном по убыванию виде, и в исходном, сгенерированном по случайному закону, причем как в прямом, так и в обратном порядке. Для каждого из варьируемых условий, кроме того, использовались различные способы исходного задания верхней границы поиска: стандартный (сумма ресурсов всех заданий), метод критического пути, обработка эволюционно-генетическим алгоритмом. Во всех случаях получена одна и та же структура матрицы загрузки (табл.2).

Таблица 2

Матрица загрузки исполнительной системы, построенная реализацией АР

Ресурс загрузки	175	177	163	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	2	0	14	0	0	0	0
Отклонение от среднего	-0,286	-2,286	11,71	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	64	60	57	50	48	48	48
	60	59	55	49	48	48	47
	51	58	51	42	44	41	44
	-	-	-	36	37	40	38

Анализ структуры загрузочной матрицы, полученной при работе АР, показывает, что из довольно большого множества структурно и параметрически различных оптимумов решения ОРЗ по критерию ММК выбирается не самое лучшее. Отклонение загрузки третьего исполнителя от оптимума, названное «дефицитом загрузки», составляет 14 при отклонении от среднего более чем в пять раз превышающем отклонение от него оптимума. При этом достаточно очевидно, что возможны значительно более равномерные варианты загрузочной матрицы, сохраняющие свойство оптимальности по ММК.

Возможные пути решения поставленной задачи. Для повышения эффективности работы любого алгоритма, в том числе и АР, необходимо его модифицировать таким образом, чтобы, сохраняя оптимум оценки (1) в соответствии с критерием (3), приблизить оценку (2) к оптимуму по критерию (4). При этом поставленную задачу можно решить двумя подходами:

1) кардинально перестроить ядро АР, обеспечив более эффективную процедуру формирования загрузок исполнителей заданиями, что неизбежно приведет к дополнительному перебору вариантов (в том или ином виде) и затягиванию процесса распределения, и без того достаточно длительного у этого алгоритма;

2) разработать алгоритм перекомпоновки данных решения ОРЗ с применением АР, реализующего тенденцию стремления оценки решения к оптимуму критерия (2) в соответствии с отношением (4).

Первый подход гарантированно сложен в реализации и трудоемок. Он, фактически, приведет к построению нового точного алгоритма, наделенного типичными недостатками, ограничивающими его применение: перебор вариантов, NP-полнота, связанная с экспоненциальным ростом сложности решения при повышении размерности.

Предпочтительным представляется второй подход, который совершенно не затрагивает ядра АР, а сводится к построению дополнительной алгоритмической консоли, исправляющей, по возможности, исходно заложенную в нем однобокость распределения заданий по исполнителям, приводящую к неэффективности параметров и структуры загрузки исполнителей, недогруженных до минимакса. Такой перекос в решении типичен для методов, реализующих идеологию «ветвей и границ».

Перестановочный алгоритм биэкстремального решения ОРЗ. Предлагаемый в данной работе алгоритм является циклическим и состоит из трех последовательно повторяющихся шагов одинакового смыслового содержания.

I. Перестройка структуры матрицы загрузки (МЗ) в соответствии с набором правил, придающих ей форму, удобную для анализа.

II. Поэлементный параметрический сравнительный анализ ресурсов заданий исполнителей, наиболее перспективных для улучшающей оптимизируемую оценку перестановки.

III. Принятие решения либо о переставляемых заданиях и его реализация в анализируемом и оптимизируемом массиве, либо об отсутствии в анализируемом варианте МЗ дальнейших улучшающих замен и о завершении работы алгоритма.

Перестройка структуры матрицы загрузки. Из табл.3 виден результат перестройки табл.2, которая осуществляется в соответствии со следующими правилами.

Правило 1. Строки всех столбцов МЗ формируются в порядке убывания ресурсов назначенных исполнителям заданий, что возможно, так как в КТР порядок выполнения заданий не регламентируется (обычно при работе АР это получается автоматически).

Правило 2. Нижние строки столбцов загрузки исполнителей с меньшим количеством заданий дополняются нулями до размера наибольшего столбца МЗ.

Правило 3. В силу условности нумерации исполнителей для ОРЗ столбцы располагаются в порядке возрастания ресурса их загрузки (в результате исполнители с максимальной загрузкой оказываются в матрице последними).

Правило 4. При одинаковых ресурсах загрузки исполнители располагаются в порядке убывания ресурсов в первых строках.

Правило 5. При одинаковых ресурсах первых для исполнителей заданий они располагаются в порядке убывания ресурсов вторых заданий и т.д.

Таблица 3

Перестроенная на начальном (нулевом) шаге матрица загрузки исполнительной системы

Матрица загрузки ИС, перестроенная по возрастанию загрузок							
Ресурс загрузки	163	175	177	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	14	2	0	0	0	0	0
Отклонение от среднего	11,71	-0,286	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	57	64	60	50	48	48	48
	55	60	59	49	48	48	47
	51	51	58	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38

Поэлементный параметрический сравнительный анализ ресурсов и управляющие решения по перестановкам в МЗ. Для анализа решаемой задачи понадобятся следующие понятия и их численные оценки:

– дефицит загрузки столбца, исследуемого на предмет замещения элемента: $\Delta R_j = R_{\max} - R_j$;

– элементарный прирост загрузки (ЭПЗ) – результат замещения задания исполнителя с дефицитом загрузки r_{kl} на задание другого исполнителя r_{ij}: $\Delta r_{kl}^{ij} = r_{ij} - r_{kl}$;

– целевой и оптимизационный пороги прироста (ЦПП и ОПП) – приросты загрузки, приводящие к нарушению постулатов биэкстремальной парадигмы решения ОРЗ: ЦПП – Δr_{kl}^{ij} >0; ОПП – $\Delta r_{kl}^{ij} < \Delta R_j$;

– столбцы МЗ условно разбиваются на две группы: столбцы-клиенты, имеющие ресурс меньше значения минимакса и являющиеся претендентами на увеличение ресурса – они слева[©], и столбцы-доноры, имеющие ресурс, равный значению минимакса и рассматриваемые на возможность передачи части ресурса «клиентам» – они справа.

С введенными оценками можно реализовать алгоритм поэлементного сравнительного анализа МЗ, принятия и реализации решений об улучшающих перестановках заданий между исполнителями. Сравнение осуществляется по формулам, записанным для произвольного столбца-

[©] Условно принятая в данной работе ориентация.

донора с номером l и столбца-клиента с номером j ($j < l$), а также их элементов – с номерами k и l соответственно:

$$\forall\, i = n_m, n_{m-1} \ldots \to \Delta r_{ij}^{kl} = r_{kl} - r_{ij} \to \begin{cases} \Delta r_{ij}^{kl} \le 0 \to j = j+1, & (a) \\ \Delta r_{ij}^{kl} \ge \Delta R_j \to i = i-1, & (б) \\ 0 < \Delta r_{ij}^{kl} < \Delta R_j \to r_{ij} \leftrightarrow r_{kl}. & (в) \end{cases} \quad (5)$$

Сравнительный анализ и перестановки осуществляются в соответствии со следующими правилами.

Правило 1. Анализ начинается с последнего столбца МЗ и его верхнего элемента. Этот элемент сравнивается поэлементно с ресурсами первого столбца (наименее загруженного).

Правило 2. Если перебор элементов столбца проходил без перестановки, и на очередном шаге привел к правомерности первого условия (5, а) – проверяемое задание столбца-клиента имеет больший ресурс, чем предполагаемое на замещение задание столбца-донора (а задания, расположенные выше, имеют ресурс, по крайней мере, не меньший), – то алгоритм переходит к рассмотрению следующего по номеру столбца-клиента с дефицитом загрузки.

Правило 3. Если перебор всех элементов столбца закончился без перестановки, и на очередном шаге привел к правомерности второго условия (5, б) – проверяемое задание столбца-клиента имеет слишком маленький ресурс, и перестановка приведет к тому, что ресурс исполнителя-клиента станет больше минимакса, т.е. превышается ОПП, – то алгоритм переходит к рассмотрению вышерасположенного элемента анализируемого столбца-клиента.

Правило 4. Последнее отношение (5, в) соответствует условию допустимости перестановки, поэтому алгоритм осуществляет перестановку заданий между исполнителями.

Правило 5. Если в пределах очередного шага происходит перестановка, алгоритм возвращается к этапу I, и если перестановка приводит к нарушению постулированной выше структуры МЗ, обеспечивающей корректность перечисленных правил ее анализа, осуществляется перенумерация исполнителей с последующим переходом к этапам II и III.

Правило 6. Если в ходе реализации правил 1-5 с перебором всех столбцов-клиентов не происходит перестановки, столбец-донор помечается как бесперспективный и исключается из поля действия алгоритма (в табл.3-10 столбцы, содержащие «неперестановочные» элементы, выделены общей жирной границей).

Применение перестановочного алгоритма биэкстремального решения ОРЗ. Результат применения данного алгоритма отражен в табл.3. Во-первых, в результате применения алгоритма из рассмотрения выведены четыре последних столбца таблицы. В результате столбцом-донором смог стать только третий столбец, а в первом столбце-клиенте выделен первый элемент, удовлетворяющий условию (5, *а*). Результат перестановки отражен в табл.4.

Ячейки с перспективными для перестановки элементами выделены одинарными зигзагообразными границами. Результат произведенной перестановки отмечен двойными зигзагообразными границами ячеек, содержащих переставленные элементы.

Перестановка привела к изменению структуры – в табл.4 третий исполнитель загружен меньше второго, а верхняя строка содержит задание с наименьшим ресурсом. Поэтому производится перестановка столбцов и заданий, отображенная в табл.5. При этом исполнители опять перенумеровываются.

Таблица 4

Перестановка в матрице загрузки исполнительной системы на первом шаге

1-й вариант перестановки МЗ ИС							
Ресурс загрузки	166	175	174	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	11	2	3	0	0	0	0
Отклонение от среднего	8,714	-0,286	0,714	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	60	64	57	50	48	48	48
	55	60	59	49	48	48	47
	51	51	58	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38

Таблица 5

Перестроенная на первом шаге матрица загрузки исполнительной системы

1-й вариант МЗ ИС – по возрастанию загрузок и убыванию ресурсов							
Ресурс загрузки	166	174	175	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	11	3	2	0	0	0	0
Отклонение от среднего	8,714	0,714	-0,286	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	60	59	64	50	48	48	48
	55	58	60	49	48	48	47
	51	57	51	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38

Далее, по изложенным выше правилам, находится новая пара заданий, образующих улучшающую критерий (2) перестановку: в первом столбце-клиенте и третьем столбце-доноре (табл.5).

Результат второй перестановки показан в табл.6. Перестановка снова привела к нарушению постулированной структуры по положению столбцов. Второй и третий столбец меняются местами и перенумеровываются. Результат отражен в табл.7, в которой также показаны новые задания для перестановки. Отличием от первых двух шагов здесь является то, что как в столбце-доноре, так и в столбце-клиенте под вариант (5, *в*) подошли уже только вторые элементы. Результат их перестановки показан в табл.8. Поскольку опять нарушена нормальная структура, делается перестроение как столбцов, так и элементов (табл.9).

Таблица 6

Перестановка в матрице загрузки исполнительной системы на втором шаге

2-й вариант МЗ ИС – после перестановки заданий							
Ресурс загрузки	170	174	171	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	7	3	6	0	0	0	0
Отклонение от среднего	4,714	0,714	3,714	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	64	59	60	50	48	48	48
	55	58	60	49	48	48	47
	51	57	51	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38

Таблица 7

Перестроенная на втором шаге матрица загрузки исполнительной системы

2-й вариант МЗ ИС - по возрастанию загрузок и убыванию ресурсов							
Ресурс загрузки	170	171	174	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	7	6	3	0	0	0	0
Отклонение от среднего	4,714	3,714	0,714	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	64	60	59	50	48	48	48
	55	60	58	49	48	48	47
	51	51	57	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38

Таблица 8

Перестановка в матрице загрузки исполнительной системы на третьем шаге

3-й вариант МЗ ИС – после перестановки заданий							
Ресурс загрузки	173	171	171	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	4	6	6	0	0	0	0
Отклонение от среднего	1,714	3,714	3,714	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	64	60	59	50	48	48	48
	58	60	55	49	48	48	47
	51	51	57	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38

Анализ перестроенной по разработанным правилам МЗ (табл.8) заставляет перейти ко второму столбцу как клиенту и так же, как и в предыдущем случае, приводит к выделению вторых элементов столбцов. Их перестановка является завершающим этапом выравнивания загрузок исполнителей, так как приводит к неулучшаемому варианту МЗ (табл.10).

Таблица 9

Перестроенная на третьем шаге матрица загрузки исполнительной системы

3-й вариант МЗ ИС - по возрастанию загрузок и убыванию ресурсов							
Ресурс загрузки	171	171	173	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	6	6	4	0	0	0	0
Отклонение от среднего	3,714	3,714	1,714	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	60	59	64	50	48	48	48
	60	57	58	49	48	48	47
	51	55	51	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38

Таблица 10

Перестановка в матрице загрузки исполнительной системы на четвертом шаге

4-й вариант МЗ ИС – после перестановки заданий							
Ресурс загрузки	171	172	172	177	177	177	177
Средняя загрузка	174,7						
Дефицит загрузки	6	5	5	0	0	0	0
Отклонение от среднего	3,714	2,714	2,714	-2,286	-2,286	-2,286	-2,286
Условный номер исполнителя	1	2	3	4	5	6	7
Ресурсы заданий исполнителей	60	59	64	50	48	48	48
	60	58	57	49	48	48	47
	51	55	51	42	44	41	44
	0	0	0	36	37	40	38
Вариант, оптимальный как по ММК, так и по КРЗ							

В верхней строке каждого блока строк, иллюстрирующего состояние соответствующего этапа коррекции загрузки, указаны сумма ресурсов всех заданий и текущие загрузки исполнителей. В следующей строке – условная средняя загрузка исполнителей, которая (как и сумма ресурсов) должна быть неизменной при любом корректно выполненном перераспределении, а далее – избыток загрузки исполнителя относительно средней. В исходном блоке этот показатель достигал 23,2, а в конечном варианте снизился до 2,2, т.е. уменьшился в 10 раз.

Выводы*.* Эффективность алгоритма селективного перестановочного обмена заданиями достаточно высока: в пять этапов решена задача оптимизации распределения по минимаксному критерию при начальном 7%-м отклонении оценки решения распределительной задачи от виртуального абсолютного оптимума. Такой результат позволяет надеяться, что теоретическое исследование и практическая проверка предложенного селективно-минимизирующего метода улучшения и оптимизации решений распределительных задач вполне целесообразны. При этом необходимо фор-

мализовать методику отыскания перспективных совокупностей взаимно обмениваемых заданий, а также методику контроля корректности совершаемых замен.

Библиографический список

1. Конвей Р.В. Теория расписаний / Р.В. Конвей, В.Л. Максвелл, Л.В. Миллер. – М.: Наука, 1975. – 360 с.

2. Коффман Э.Г. Теория расписания и вычислительные машины / Э.Г. Коффман. – М.: Наука, 1987. – 334 с.

3. Романовский И.В. Алгоритмы решения экстремальных задач / И.В. Романовский. – М.: Наука, 1977. – 352 с.

4. Будиловский Д.М. Оптимизация решения задач теории расписаний на основе эволюционно-генетической модели распределения заданий: дис. … канд. техн. наук. – Ростов н/Д, 2007.

5. Филиппов А.В. Эквивалентно-селективный метод повышения эффективности работы распределительных алгоритмов / А.В. Филиппов, З.Х. Ягубов, Р.А. Нейдорф // «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства»: Тр. IX междунар. науч.-техн. конф. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С.366-373.

6. Филиппов А.В. Ресурсно-точностной анализ алгоритма критического пути / А.В. Филиппов // Тр. 1-го Междунар. семинара студентов, аспирантов и ученых «Системный анализ, управление и обработка информации» / под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С.98-106.

7. Нейдорф Р.А. Селективно-минимизирующий метод повышения эффективности работы приближенных распределительных алгоритмов / Р.А. Нейдорф, А.В. Филиппов, З.Х. Ягубов // Тр. 1-го междунар. семинара студентов, аспирантов и ученых «Системный анализ, управление и обработка информации» / под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С.106-115.

8. Нейдорф Р.А. Методологические проблемы теории расписаний/ Р.А. Нейдорф, В.Г. Кобак // Системный анализ, управление и обработка информации: 1-й межвуз. сб. науч. ст. / ДГТУ; ТТИ ЮФУ. – Ростов н/Д, 2007. – С.101-108.

Материал поступил в редакцию 20.04.2011.

References

1. Konvej R.V. Teoriya raspisanij / R.V. Konvej, V.L. Maksvell, L.V. Miller. – M.: Nauka, 1975. – 360 s. – In Russian.

2. Koffman E`.G. Teoriya raspisaniya i vy`chislitel`ny`e mashiny` / E`.G. Koffman. – M.: Nauka, 1987. – 334 s. – In Russian.

3. Romanovskij I.V. Algoritmy` resheniya e`kstremal`ny`x zadach / I.V. Romanovskij. – M.: Nauka, 1977. – 352 s. – In Russian.

4. Budilovskij D.M. Optimizaciya resheniya zadach teorii raspisanij na osnove e`volyucionno-geneticheskoj modeli raspredeleniya zadanij: dis. … kand. texn. nauk. – Rostov n/D, 2007. – In Russian.

5. Filippov A.V. E`kvivalentno-selektivny`j metod povy`sheniya e`ffektivnosti raboty` raspredelitel`ny`x algoritmov / A.V. Filippov, Z.X. Yagubov, R.A. Nejdorf // «Innovaciya, e`kologiya i resursosberegayushhie texnologii na predpriyatiyax mashinostroeniya, aviastroeniya, transporta i sel`skogo xozyajstva»: Tr. IX mezhdunar. nauch.-texn. konf. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – S.366-373. – In Russian.

6. Filippov A.V. Resursno-tochnostnoj analiz algoritma kriticheskogo puti / A.V. Filippov // Tr. 1-go мezhdunar. seminara studentov, aspirantov i uchyony`x «Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii» / pod obshh. red. R.A. Nejdorfa. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – S.98-106. – In Russian.

7. Nejdorf R.A. Selektivno-minimiziruyushhij metod povy`sheniya e`ffektivnosti raboty` priblizhyonny`x raspredelitel`ny`x algoritmov / R.A. Nejdorf, A.V. Filippov, Z.X. Yagubov // Tr. 1-go mezhdunar. seminara studentov, aspirantov i uchyony`x «Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii» / pod obshh. red. R.A. Nejdorfa. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – S.106-115. – In Russian.

8. Nejdorf R.A. Metodologicheskie problemy` teorii raspisanij / R.A. Nejdorf, V.G. Kobak // Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii: 1-j mezhvuz. sb. nauch. st. / DGTU; TTI YUFU. – Rostov n/D, 2007. – S.101-108. – In Russian.

EXCHANGE ALGORITHM OF BIEXTREMAL SOLUTION TO HOMOGENEOUS ALLOCATION PROBLEM

R.A. NEYDORF
(Don State Technical University),
A.V. FILIPPOV, Z.K. YAGUBOV
(Ukhta State Technical University)

An effective algorithm of constructing optimal solutions to homogeneous allocation problems is developed. It is called a biextremal solution algorithm because it permits to find the distribution carrying an extremum to two popular distribution evaluations simultaneously: uniformity of distribution criterion and minimax criterion. The principle of its operation consists in formalizing structure transformation of the core-image matrix derived by Romanovsky's algorithm with further formalized rearrangement of tasks between their executors. An example of incremental solution to the particular problem is provided.

Keywords: *algorithm, theory of scheduling, allocation problem, homogeneous system, optimization criterion, biextremal solution, permutable rule.*

УДК 629.735.45

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО АЗИМУТА УСТАНОВКИ ЛОПАСТЕЙ СООСНОГО СВЕРХЛЕГКОГО ВЕРТОЛЕТА

В.В. ДУДНИК, В.А. КОЛОТ
(Донской государственный технический университет)

Обоснована возможность снижения вибрации сверхлегкого соосного вертолета на проходной гармонике посредством установки лопастей на оптимальном азимуте. Представлены методика аэродинамического расчета винтов и результаты расчетов для горизонтального полета вертолета «Роторфлай». Определено, что оптимальным азимутом встречи лопастей является угол 37,5 градусов по направлению вращения верхнего винта.
Ключевые слова: *соосный вертолет, лопасть, несущий винт вертолета.*

Введение. Двухместный вертолет «Роторфлай» на сегодняшний день является единственным сверхлегким вертолетом (СЛВ) в России. Выполненные на нем эксперименты по измерению вибрации показали высокий уровень второй гармоники на режиме горизонтального полета. Это нормально обусловленная вибрация, вызванная перекосом тяги вследствие неравномерной обдувки несущего винта (НВ). Вторая гармоника данного СЛВ на самом деле представляет собой сумму колебаний верхнего и нижнего винтов. Если рассмотреть вопрос с точки зрения оптимизации вибрации, то можно сделать вывод, что фаза вибрации зависит от начальной точки движения лопасти. Соответственно, изменением начальных точек, а точнее, смещением линии встречи лопастей, фазы колебаний могут быть смещены на противоположные. В таком случае вторая гармоника колебаний может быть практически сведена к нулю. Допущения, принятые в расчетах, сложность определения диссипативных свойств конструкции не позволят оценить вибрацию, передающуюся на вертолет, однако позволят определить фазы колебаний и, соответственно, смещение начальных азимутов винтов друг относительно друга.

Основные параметры СЛВ. Для расчетов оптимального азимута встречи лопастей был выбран прямолинейный полет в скоростном диапазоне 80–100 км/ч. Это диапазон, в котором происходит наибольшее количество полетов СЛВ, но при этом влияния верхний винт на нижний почти не оказывает, так как наклон индуктивного потока велик [1, 6-8] и он просто сдувается до плоскости нижнего винта. Вследствие этого фазы колебаний винтов рассматривались без учета взаимного влияния.

В указанном диапазоне угол атаки фюзеляжа СЛВ близок к нулю, так как угол заклинения несущего винта соответствует скорости полета 84 км/ч. Соответственно тарелки автомата перекоса практически перпендикулярны оси вала винта. Наклон автомата перекоса в поперечном направлении для компенсации перекоса тяги не осуществляется, так как соосный вертолет компенсирует его за счет наличия второго винта обратного вращения.

Внешний вид вертолета «Роторфлай» изображен на рис.1. Лопасти верхнего и нижнего винтов совмещаются на азимутах 0, 90, 180, 270 градусов. Это удобно с точки зрения хранения вертолета. При таких азимутах вертолет в стояночном положении имеет минимальную ширину 1,74 м, обусловленную шириной полозков, что позволяет помещать его в автомобильный гараж. Крепление втулок винтов дает возможность поворачивать НВ относительно вала и закреплять в любом азимутальном положении лопастей.



Рис.1. Внешний вид двухместного СЛВ «Роторфлай»

Для определения фаз колебаний НВ были выполнены расчеты аэродинамических характеристик изолированных винтов.

Методика аэродинамического расчета НВ. Для выполнения расчетов фаз колебаний был применен метод расчета движения элемента лопасти. Он основан на допущении, что каждый элемент лопасти винта можно рассматривать как отрезок профиля, двигающийся по винтовой линии. Подъемную силу и лобовое сопротивление рассчитывают исходя из результирующей скорости потока, обтекающего этот профиль, причем считается, что прилегающие части лопасти не влияют на характеристики рассматриваемого отрезка профиля. Тягу и крутящий момент винта получают интегрированием элементарных тяг и моментов отдельных элементов лопасти. Таким образом, задачу определения аэродинамических характеристик несущего винта решают при следующих допущениях:

– лопасть является жесткой на изгиб и кручение, но имеет две степени свободы: вращение относительно горизонтального шарнира и поворот в осевом направлении на торсионе;

– не учитывается жесткость проводки управления.

На элементе лопасти при вращении возникают аэродинамические силы, обусловленные наличием как окружной и пропульсивной скоростей, так и вертикальной составляющей проходящего через винт потока. При прохождении потока снизу вверх вертикальная составляющая скорости потока U_y положительна и угол атаки α превышает угол установки лопасти φ. В большинстве режимов полета величина U_y отрицательна и реальный угол атаки меньше угла установки.

Значение тяги элемента лопасти равно значению подъемной силы элемента:

$$dT = c_y \frac{\rho U_\Sigma^{\ 2}}{2} bdr = c_y \frac{\rho (U_x^2 + U_y^2)}{2} bdr ,$$

где c_y – коэффициент подъемной силы профиля на участке элемента лопасти; ρ – плотность воздуха; U_Σ – суммарная скорость обтекания элемента лопасти; b – хорда лопасти; dr – длина элемента лопасти вдоль радиуса; U_x, U_y – проекции скорости движения элемента лопасти.

Коэффициент подъемной силы на линейном участке зависимости может быть определен по формуле:

$$c_y = \alpha_p a_\infty = a_\infty \left(\varphi + \frac{U_y}{U_x} \right),$$

где α_p – текущий угол атаки сечения относительно точки нулевой подъемной силы профиля; a_∞ – производная коэффициента подъемной силы по углу атаки; φ – угол установки профиля.

Скорость продольного движения представляет собой сумму пропульсивной и окружной скоростей:

$$U_x = r\omega + \mu R\omega \sin\psi,$$

где r – текущее значение радиуса; ω – угловая скорость НВ; μ – относительная скорость; R – радиус НВ; ψ – азимут лопасти.

Вертикальная составляющая скорости элемента лопасти зависит от коэффициента протекания, окружной скорости махового движения относительно горизонтального шарнира, составляющей пропульсивного движения, обусловленной наличием угла конусности и угловыми скоростями вращения СЛВ относительно продольной и поперечной осей:

$$U_y = \lambda R\omega - r\frac{d\beta}{dt} - \mu R\omega\beta\cos\psi + \omega_{\text{в}z} r\cos\psi - \omega_{\text{в}x} r\sin\psi,$$

где λ – коэффициент протекания НВ; β – угол конусности; $\omega_{\text{в}z}$, $\omega_{\text{в}x}$ – угловые скорости вертолета относительно осей.

При интегрировании величины тяги винта по радиусу необходимо учесть потерю эффективности НВ на краю диска вследствие перетекания воздуха на концах лопастей. Зона распространения концевых потерь зависит от удельной нагрузки на лопасть и на весь винт.

Однако малонагруженные вертолетные винты, к которым относятся винты СЛВ, можно рассчитывать с учетом допущения о том, что часть лопасти длиной, равной половине концевой хорды, не создает подъемной силы [2]. В этом случае относительный радиус рабочей части лопасти

$$B = 1 - \frac{b}{2R}.$$

Для данного НВ при таком допущении коэффициент концевых потерь равен 0,97. Эта цифра была подтверждена летными испытаниями [2], которые показали, что концевые потери уменьшают эффективный радиус лопасти на 3-4%.

Интегрированное значение тяги лопасти определяется как

$$T = \frac{z_\text{л}}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\psi \int_{R_0}^{BR} dT,$$

где $z_\text{л}$ – количество лопастей; R_0 – радиус начала рабочей части лопасти.

С учетом значения скоростей тяга изолированного НВ представляет собой интеграл:

$$T = \frac{z_\text{л}}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\psi \int_{R_0}^{BR} \left(\frac{1}{2} b\rho\alpha_\infty (\phi(r^2\omega^2 + 2\omega^2 Rr\mu\sin\psi + \mu^2 R^2\omega^2 \sin\psi) + \lambda\omega^2 Rr - \right.$$
$$-\frac{d\beta}{dt}\omega r^2 - \beta\mu\omega^2 Rr\cos\psi - \Omega_x \omega r^2 \sin\psi + \lambda\mu\omega^2 R^2 \sin\psi - \frac{d\beta}{dt}\mu\omega Rr\sin\psi -$$
$$-\beta\mu^2\omega^2 R^2 \sin\psi\cos\psi - \Omega_x\omega\mu Rr\sin^2\psi + \Omega_y\omega r^2\cos\psi +$$
$$\left. + \Omega_y\omega\mu Rr\sin\psi\cos\psi) \right) dr.$$

При численном интегрировании лопасть разбивается на элементы длиной

$$dr_{\text{т}} = \frac{\left(BR - R_0\right)}{n_b},$$

где n_b – количество отрезков, на которые разбивается лопасть.

Радиус i-го элемента лопасти

$$r_{\text{т}i} = r_{\text{т}(i-1)} + dr_{\text{т}},$$

при этом первое сечение

$$r_{\text{т}1} = R_0 + \frac{dr}{2}.$$

Угол установки сечений при линейной геометрической крутке лопасти:

$$\varphi = \left(\left(\varphi_7 + \frac{0,7R - r_i}{R - R_0}\Delta\varphi - K_{\text{к}}\beta\right) - A_1\cos\psi - B_1\sin\psi\right)\frac{\pi}{180},$$

где φ_7 – угол установки лопасти на 7-м сечении; $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_R$ – крутка лопасти; $K_{\text{к}}$ – коэффициент компенсатора взмаха, зависящий от величины махового движения лопасти. В случае если СЛВ не использует компенсатор взмаха, то $K_{\text{к}}$=0; A_1 – угол наклона кольца автомата перекоса в продольном направлении (положительное направление – отклонение автомата перекоса назад); B_1 – угол наклона кольца автомата перекоса в поперечном направлении (положительное направление – отклонение автомата перекоса влево при вращении НВ по часовой стрелке).

Угол конусности определяется в результате приравнивания моментов, образуемых аэродинамическими, массовыми и центробежными силами. Вследствие вращательного движения НВ, значение угла конусности является периодической функцией, для описания которой используется преобразование Фурье. Учитывая малость значений второй гармоники угла конусности лопасти, их можно опустить [3]. Тогда угол конусности

$$\beta = a_0 - a_1\cos\psi - b_1\sin\psi,$$

где a_0 – составляющая угла конусности, не зависящая от махового движения, фактически равная β на вертикальном режиме; a_1 – амплитуда косинусоидального движения; b_1 – амплитуда синусоидального движения.

Угол конусности зависит, в первую очередь, от массы лопасти, так как центробежная сила возрастает при ее увеличении.

Составляющие угла конусности равны [4]:

$$a_0 = a_0' - \gamma\frac{B^3\omega_x}{6\omega}\mu,$$

$$a_1 = a_1' - \left(\frac{B^4\omega_x}{\omega} + \frac{8\omega_z}{\gamma\omega}\right)\frac{1}{B^2\left(B^2 - \frac{1}{2}\mu^2\right)},$$

$$b_1 = b_1' - \left(\frac{B^4\omega_z}{\omega} - \frac{8\omega_x}{\gamma\omega}\right)\frac{1}{B^2\left(B^2 + \frac{1}{2}\mu^2\right)},$$

$$a_0' = \gamma\left[\frac{B^3}{3}\lambda + \frac{\varphi}{4}B^2\left(B^2 + \mu^2\right)\right] - \frac{S_{\text{г.ш}}}{I_{\text{г.ш}}},$$

$$a_1' = 2\mu\left(\lambda + \frac{4}{3}B\varphi\right)\frac{1}{B^2 - \frac{1}{2}\mu^2},$$

$$b_1' = \frac{4}{3}\mu a_0 \frac{B}{B^2 + \frac{1}{2}\mu^2},$$

где γ – массовая характеристика лопасти; $S_{\text{г.ш}}$ – статический момент лопасти относительно горизонтального шарнира; $I_{\text{г.ш}}$ – момент инерции лопасти относительно горизонтального шарнира.

Массовая характеристика лопасти

$$\gamma = \frac{b\rho a_\infty R^4}{2I_{\text{г.ш}}}.$$

Коэффициент протекания НВ в общем случае определяется по формуле [5]:

$$\lambda = \mu \operatorname{tg}\alpha_{\text{в}} + \lambda_i,$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – угол атаки НВ (положительный наклон назад);

$$\lambda_i = \frac{C_{\text{т}}}{2\sqrt{\mu^2 + \lambda^2}}.$$

В этом случае для определения коэффициента протекания необходимо решить уравнение 4-го порядка. Однако вместо этого можно определить λ, решая последовательными приближениями по методу Ньютона–Рафсона уравнение

$$\lambda - \mu \operatorname{tg}\alpha + \frac{C_{\text{т}}}{2\sqrt{\mu^2 + \lambda^2}} = 0.$$

Кроме тяги, в расчете определяли крутящий момент и продольную аэродинамическую силу. Момент для изолированного НВ

$$dM_{\text{к}} = \frac{1}{2}b\rho\left(C_{xp}U_x^2 - a_\infty\varphi U_x U_y - a_\infty U_y^2\right)rdr,$$

$$M_{\text{к}} = \frac{z_{\text{л}}}{2\pi}\int_0^{2\pi}d\psi\int_{R_0}^{BR}dM_{\text{к}}.$$

Продольная сила, возникающая в полете на участке лопасти, может быть определена по формуле:

$$dH = \frac{dM_{\text{к}}}{r}\sin\psi - \beta dT\cos\psi,$$

$$H = \frac{z_{\text{л}}}{2\pi}\int_0^{2\pi}d\psi\int_0^{BR}\frac{\sin\psi}{r}dM_{\text{к}} - \frac{z_{\text{л}}}{2\pi}\int_0^{2\pi}d\psi\int_0^{BR}\beta\cos\psi dT.$$

Результаты расчетов характеристик НВ. При расчете были определены аэродинамические характеристики НВ вертолета «Роторфлай». В частности, на рис.2 приведены углы атаки лопасти для скорости горизонтального полета 80 км/ч. Видно, что вблизи внутренней нерабочей части лопасти, несмотря на то, что зона обратного обтекания напрямую не попадает на рабочую часть

лопасти, появляется зона неопределенных углов, в которой значения углов атаки значительно колеблются и подъемная сила не создается.

Интегрирование подъемной силы лопастей показало, что наступающая лопасть имеет большую тягу, однако снижение тяги отступающей лопастью более интенсивно (рис.3). Более «растянутое» по азимуту увеличение тяги наступающей лопасти не компенсирует амплитуду снижения отступающей, что приводит к периодическим колебаниям суммарной тяги лопастей изолированного НВ.

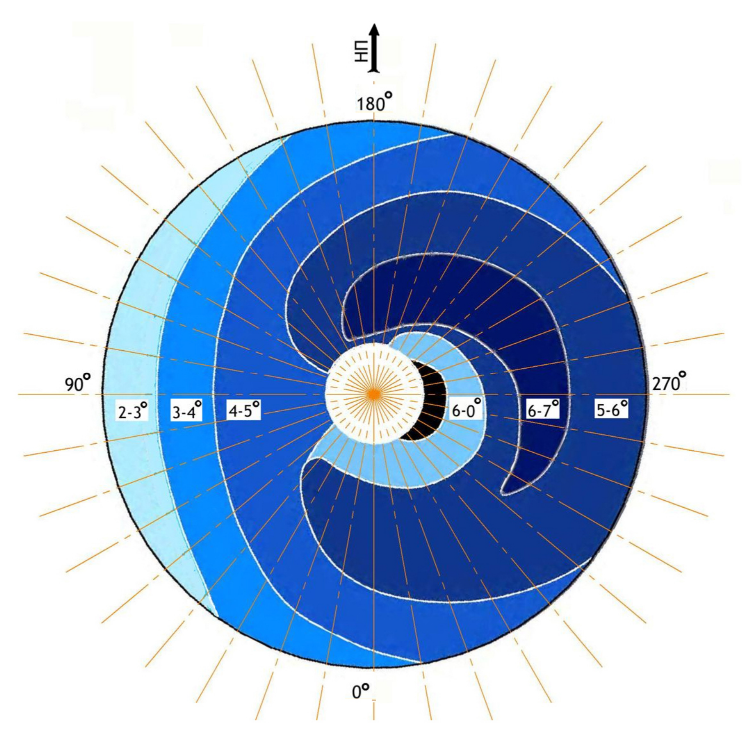


Рис.2. Распределение аэродинамических углов атаки по диску верхнего НВ СЛВ «Роторфлай» в горизонтальном полете на скорости пропульсивного движения 80 км/ч (черным отмечена зона с большими перепадами углов атаки)

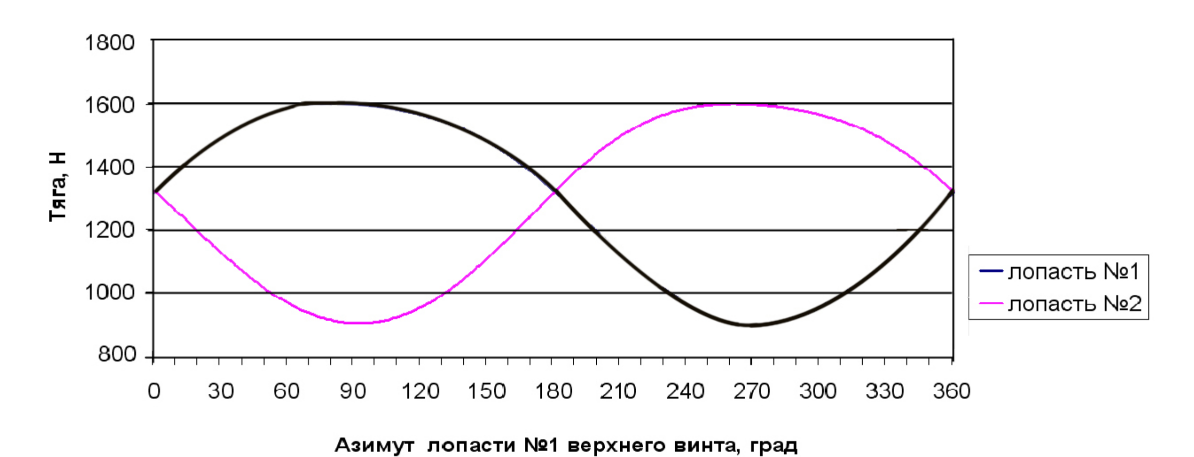


Рис.3. Тяга лопастей верхнего несущего винта, приведенная по времени к азимуту лопасти №1

Временная зависимость суммарной тяги верхнего и нижнего НВ вертолета «Роторфлай», приведенная к азимутам лопасти №1 верхнего НВ показывает, что интенсивность суммарной вибрации с увеличением скорости быстро растет, причем амплитуда этой вибрации равна второй гармонике.

Выбор оптимального угла встречи лопастей. Для выбора оптимального угла встречи лопастей НВ было разработано программное обеспечение, которое работало по следующему алгоритму.

Рассчитанный файл данных зависимости тяги верхнего винта от времени считывался программой, в которой создавался массив данных верхнего НВ. Далее образовывался массив данных нижнего винта, в котором значения верхнего винта переприсваивались массиву нижнего винта, при этом азимуты с шагом 1º присваивались в обратном порядке азимутов

$$T_{н}(\kappa) = T_{в}(360 - \kappa),$$

где $T_н$ – значение тяги нижнего НВ в момент времени, соответствующий текущему значению азимута лопасти №1 верхнего НВ; $T_в$ – значение тяги верхнего НВ в момент времени, соответствующий текущему значению азимута лопасти №1 верхнего НВ; κ – текущее значение азимута лопасти №1 верхнего НВ (от 1 до 360).

Суммирование массивов данных в идентичные моменты времени, соответствующие повороту лопасти №1 верхнего винта с шагом 1º на 1 оборот вала НВ, создает новый массив данных, который соответствует суммарному значению тяги винтов.

В суммарном массиве определяются минимальное и максимальное значения тяги в течение одного оборота винта и их разность ΔT. После чего происходит сдвижка текущего азимута нижнего винта на 1º и переприсвоение нового массива по всем азимутам от 1 до 360º:

$$T_{н}(\kappa) = T_{н}(\kappa + 1).$$

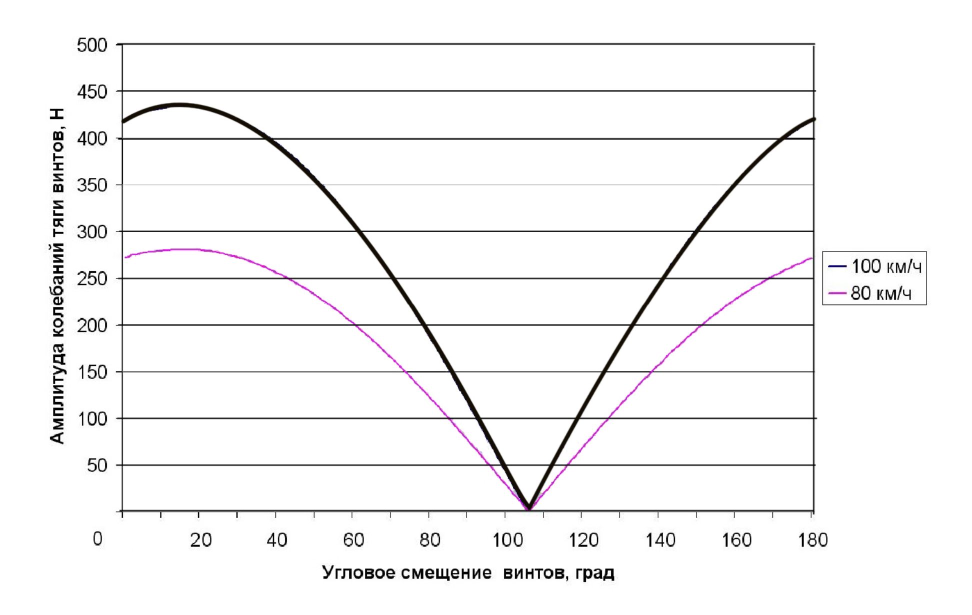


Рис.4. Зависимость интенсивности колебаний тяги винтов на второй гармонике от угла смещения лопастей

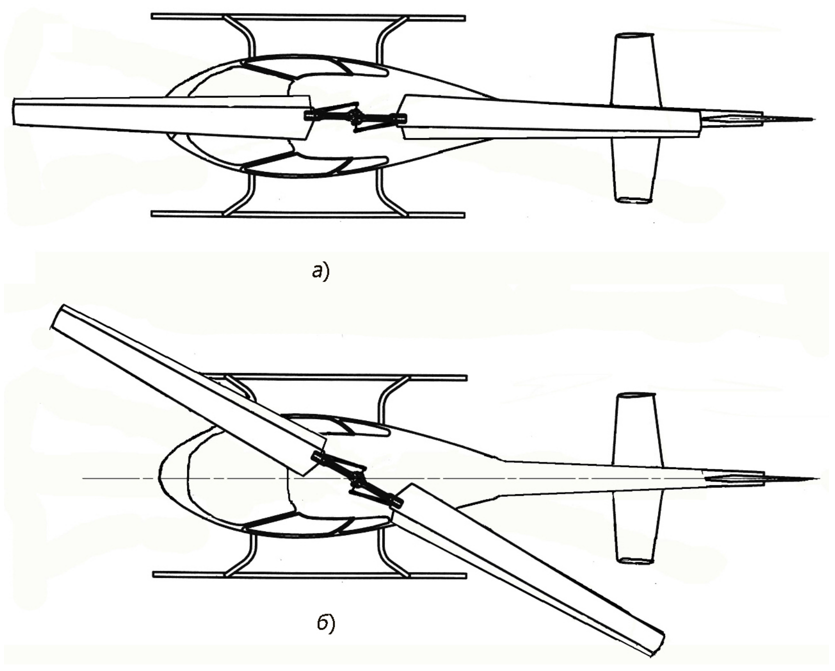


Рис.5. Вид сверху на СЛВ «Роторфлай» до (*а*)
и после (*б*) изменения углов совмещения лопастей

Проводимое после этого повторное суммирование массивов тяг НВ и определение разности между минимумом и максимумом позволяет создать новый массив и файл, в котором записывается интенсивность колебаний в зависимости от угла сдвижки фаз верхнего и нижнего НВ (см. рис.4). Как показывает эта зависимость, оптимальное смещение начальной фазы, при котором вторая гармоника НВ будет взаимно уничтожаться верхним и нижним винтами, составляет 105º. Такое начальное смещение будет соответствовать азимуту совмещения лопастей 37,5º (рис.5, *б*). Колебания тяги винта при таком смещении будут находиться в противофазе.

Выводы. Для уменьшения основной проходной гармоники на режимах горизонтального полета целесообразно переставить лопасти НВ СЛВ «Роторфлай» в положение, соответствующее повороту по направлению часовой стрелки на 37,5º. При этом ширина СЛВ увеличится с 1,47 до 3,65 м, что может быть неудобно с точки зрения хранения вертолета, однако может существенно повлиять на ресурс и эффективность вертолета, особенно при полете на высоких скоростях.

Библиографический список

1. Белоцерковский С.М. Исследование на ЭВМ аэродинамических и аэроупругих характеристик винтов вертолетов / С.М. Белоцерковский, Б.Е. Локтев, М.И. Ништ. – М.: Машиностроение, 1992. – 160 с.

2. Гессоу А. Аэродинамика вертолета / А. Гессоу, Г. Мейерс. – М.: Оборонгиз, 1954. – 256 с.

3. Джонсон У. Теория вертолета. Т.1 / У. Джонсон. – М.: Мир, 1983. – 502 с.

4. Миль М.Л. Вертолеты. Расчет и проектирование. Т.1. Аэродинамика / М.Л. Миль [и др.]. – М.: Машиностроение, 1966. – 450 с.

5. Пейн П.Р. Динамика и аэродинамики вертолета / П.Р. Пейн. – М.: Оборонгиз, 1963. – 440 с.

6. Anikin V.A. Modeling of Coaxial Helicopter Flight Characteristics / V.A. Anikin, B.A. Vasiliev, V.N. Kvokov // 33 European Rotorcraft Forum. – Kazan, 2007. – С.78.1-78.12.

7. Bourtsev B.N. Helicopter Wake Form Visualization results and their Application to Coaxial Rotor Analysis at Hover / B.N. Bourtsev, V.I. Ryabov, S.V. Selemenev // 27 European Rotorcraft Forum. – M., 2001. – С.64.1-64.13.

8. Kang N. Prediction of the Flow Field of a Rotor in Ground Effect / N. Kang, M. Sun // J. of the American Helicopter Society. – 1997. – N2. – С.195-198.

Материал поступил в редакцию 18.04.2011.

References

1. Belocerkovskij S.M. Issledovanie na E`VM ae`rodinamicheskix i ae`rouprugix xarakteristik vintov vertolyotov / S.M. Belocerkovskij, B.E. Loktev, M.I. Nisht. – M.: Mashinostroenie, 1992. – 160 s. – In Russian.

2. Gessou A. Ae`rodinamika vertolyota / A. Gessou, G. Mejers. – M.: Oborongiz, 1954. – 256 s. – In Russian.

3. Dzhonson U. Teoriya vertolyota. T.1 / U. Dzhonson. – M.: Mir, 1983. – 502 s. – In Russian.

4. Mil` M.L. Vertolyoty`. Raschyot i proektirovanie. T.1. Ae`rodinamika / M.L. Mil` [i dr.]. – M.: Mashinostroenie, 1966. – 450 s. – In Russian.

5. Pejn P.R. Dinamika i ae`rodinamiki vertolyota / P.R. Pejn. – M.: Oborongiz, 1963. – 440 s. – In Russian.

6. Anikin V.A. Modeling of Coaxial Helicopter Flight Characteristics / V.A. Anikin, B.A. Vasiliev, V.N. Kvokov // 33 European Rotorcraft Forum. – Kazan, 2007. – S.78.1-78.12.

7. Bourtsev B.N. Helicopter Wake Form Visualization results and their Application to Coaxial Rotor Analysis at Hover / B.N. Bourtsev, V.I. Ryabov, S.V. Selemenev // 27 European Rotorcraft Forum. – M., 2001. – S.64.1-64.13.

8. Kang N. Prediction of the Flow Field of a Rotor in Ground Effect / N. Kang, M. Sun // J. of the American Helicopter Society. – 1997. – N2. – S.195-198.

DETERMINATION OF OPTIMAL AZIMUTH FOR MOUNTING ULTRALIGHT COAXIAL HELICOPTER BLADES

V.V. DUDNIK, V.A. KOLOT
(Don State Technical University)

The possibility of reducing vibration of the ultralight coaxial helicopter blades on the through harmonic wave by mounting blades on the optimal azimuth is shown. The methods of the aerodynamic calculation of rotors and the calculation results for the horizontal flight of "Rotorfly" helicopter are offered. The optimal azimuth of blades intersection is defined as 37.5 degrees angle along the direction of the upper rotor rotation.
Keywords: *coaxial helicopter, blade, helicopter rotor.*

УДК 620.22:004.92

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

В.Н. ПУСТОВОЙТ, С.А. ГРИШИН, М.В. ЗАЙЦЕВА
(Донской государственный технический университет)

Приведена методика использования компьютерной графики для обработки экспериментальных данных в режиме реального времени, получаемых в научно-исследовательской практике современного материаловедения.
Ключевые слова: *методика, компьютерная графика, исследование и обработка результатов нестационарных процессов.*

Введение. Компьютерная графика все более широко внедряется в технику: разработка чертежей с помощью различных графических редакторов, твердотельное моделирование, системы САПР и т.д. Однако это применение не исчерпывает все ее возможности, поскольку некоторые элементы компьютерной графики могут найти реальное применение при исследовании течения нестационарных процессов и тем самым позволят получить более широкий спектр экспериментальных данных.

Ранее [1, 2] была показана возможность использования компьютерной графики при визуализации процессов в учебных и научных целях. Кроме этого, существует еще одна проблема, которая может быть успешно решена с помощью средств компьютерной графики.

В процессе проведения различного рода исследований часто возникает потребность обработки экспериментальных данных в целях получения каких-либо дополнительных характеристик. Для этого могут быть использованы математические методы, которые применяются в специальных программах, предназначенных для обработки экспериментальных данных, таких, как MathCAD, MatLab, Excel и др. Однако применение таких пакетов требует серьезных познаний в математике, а также подбора определенных математических функций и выбора аргументов. При этом универсальные математические пакеты не ориентированы на конкретный тип и структуру экспериментальных данных, и такие программы предназначены в основном только для обработки результатов эксперимента. Вместе с тем область проводимых экспериментальных исследований настолько широка, что ни один из существующих универсальных пакетов обработки данных эксперимента не может обеспечить полное выполнение задачи исследователя, тем более при обработке сигнала, поступающего с какого-либо датчика, в режиме реального времени.

В последнее время компьютеры успешно применяются в качестве измерительных приборов, и это находит все большее распространение в научно-исследовательской практике. При этом возникает возможность не только регистрировать электрический сигнал, поступающий на вход компьютера, но и проводить его обработку с целью получить какие-либо новые характеристики.

Оборудование и программное обеспечение. Рассмотрена возможность использования средств компьютерной графики при обработке экспериментальных данных, поступающих в виде электрического сигнала в режиме реального времени. При этом электрический сигнал подавался на вход ЭВМ через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), собранный по схеме и работающий по управляющей им программе [3]. Слабым электрическим сигналам требовалось усиление, для чего применялся прецизионный усилитель, собранный по определенной схеме [4].

Постановка задачи. Известно [5], что протекание любого физического процесса, например нагрев или охлаждение металла, можно представить в виде графика «пройденного пути». Дифференцирование элементарного участка этого пути дает значение «скорости», а дифференцирование элементарного участка графика скорости дает, соответственно, величину «ускорения». Обработку подобных графиков «пройденного пути» можно выполнить с помощью графического дифференцирования, проводимого ЭВМ. В данном случае была использована программа на Turbo-Basic [3], которая позволяла выводить на экран дисплея ЭВМ график течения процесса. После ее переработки с помощью метода графического дифференцирования появилась возможность от-

слеживать не только график самого нестационарного процесса, но и обрабатывать полученные в реальном времени экспериментальные данные и получать одновременно на экране ЭВМ сразу несколько характеристик, т.е. график самого нестационарного процесса (график «пройденного пути»), а также график «скорости», а при необходимости и график «ускорения», что позволяет визуально наблюдать за изменением изучаемого процесса, значительно сокращая время на обработку экспериментальных данных и получая более достоверные по точности результаты.

```
'Программа на языке ТВ с выводом на экран дисплея графиков изменения пути,
'скорости, ускорения и формирования обменного DXF.
1 CLS: Screen 9
2 Window(0,297)-(420,0)
3 Print "Записывать данные чертежа в DXF (Y/N)"
4 j$=inkey$: if j$="" then 4
if j$="n" goto 5
if j$="y" goto 6
5 regim=1: goto 13
6 regim=2: goto 7
'Открытие DXF чертежа
7 line input "Задайте имя DXF чертежа: ";PL$
8 open "o",1,PL$+".DXF"
9 print #1,0
10 print #1,"SECTION"
11 print #1,2
12 print #1,"ENTITIES"
'Ввод данных
13 XX=0:YY=0:XXv=0:YYv=0:XXa=0:YYa=0:XX1=0:YY1=0:XXv1=0:YYv1=0:
XX2=0:YY2=0:XXv2=0:YYv2=0:x=0:y=0:n=400:tk=29:tz=0.03:j=tk/tz:h=n/j:Tpr=0
Ms=55: Mv=10 :Mv1=1: Mv2=1: Ma=10: sd=10:
'Выполнение чертежа и запись в DXF
14 CLS: Mtimer: View (1,300)-(460,330),0,1: View (470,300)-(590,330),0,4:
  View (600,300)-(638,330),0,5: View (1,1)-(638,290),0,10:
  Line (XX,YY)-(XX,YY+280),4: if regim=1 goto 15
   XS=XX: YS=YY: XF=XX: YF=YY+280: gosub 50
15 Line (XX,YY)-(XX+630,YY),4: if regim=1 goto 16
   XS=XX: YS=YY: XF=XX+630: YF=YY: gosub 50
16 'драйвер TLC-549
   B=&H2F8: N=8: 'порт COM2
   OUT B+4,1:  for T=0 to 100: next T
   OUT B+3,64: for T=0 to 500: next T
goto 150
100 OUT B+4,0: D=0: for F=0 to N-1
   OUT B+4,2: E=INP(B+6) AND 16: OUT B+4,0
   if E=16 then D=D+2^(N-1-F)
   next F
   D=5*D/(2^N-1): OUT B+4,1: Return
150: 'Вольтметр
160 Gosub 100
D=INT(100*D)/100: y=D: if x=0 then 18 else 19
   18 YY=y: YYv=y: YYa=y:
   19 Gosub 200
25 if x=n goto 30
   if x>640 goto 30
```

```
  Locate 23,2,0: Print "Tпр="(Tpr);"c.     " :Tpr=Tpr+tz
  if Tpr>tk goto 30
  x=x+h: delay tz:
'Прерывание работы программы клавишей F12
 ON KEY (31) gosub 999
 KEY (31) ON
goto 160
30 T1=Mtimer: T2=T1/1000000: Locate 23,2,0: Print "T="(T2);"c.     ":
  if regim=1 goto 40
'Закрытие DXF
34 print #1,0
35 print #1,"ENDSEC"
36 print #1,0
37 print #1,"EOF"
38 close 1
39 Locate 23,60,0: Print "DXF= ";PL$
40 Locate 23,77,0: Print "END": beep
41 End
50 'Подпрограмма записи отрезка графика
  print #1,0: print #1,"LINE": print #1,8: print #1,"0": print #1,10
  print #1,XS: print #1,20: print #1,YS: print #1,11: print #1,XF: print #1,21
  print #1,YF: return
200 'Подпрограмма скорости в координатах X=V,Y=y
   y=y*Ms: Line (XX,YY)-(x,y),15 : if regim=1 goto 202
   XS=XX: YS=YY: XF=x: YF=y: gosub 50
202 'скорость
   if x=0 goto 206
   Vo=Vc: Vc=((sqr(((YYv-y)^2)+(h^2)))/h): Sk1=Vc*Mv
   Line (XXv+sd,YYv)-(Sk1,y),14: if regim=1 goto 204
   XS=XXv: YS=YYv: XF=Sk1: YF=y: gosub 50
204 XX=x: YY=y: XXv=Sk1: YYv=y
'ускорение
   if Vo=0 goto 206
   Ay=((Vc-Vo)/h)*Ma: Line (XXa+sd,YYa)-(Ay+sd,y),13: if regim=1 goto 206
   XS=XXa+sd: YS=YYa: XF=Ay+sd: YF=y: gosub 50
206 XXa=Ay: YYa=y: Return
999 beep: beep
```

В данном случае график самого процесса (т.е. график «пройденного пути») строился на основании данных величины электрического сигнала, полученного, например, от термопары, усиленного и поступающего на вход ЭВМ через АЦП. Этот сигнал проходил обработку по разработанной программе и в общем случае имел вид, представленный на рис.1. То есть такой график формировался по точкам T_1, T_2, T_3 и т.д. При этом элементарный участок графика «пройденного пути»

$$S = \sqrt{\left(X_2 - X_1\right)^2 + \left(Y_2 - Y_1\right)^2}\,, \qquad (1)$$

где X_1, Y_1 и X_2, Y_2 – координаты соответственно начальной и конечной точек T_1 и T_2.

Для получения значений скорости на этом участке «пройденного пути» проводилась обработка по приведенной выше программе методом графического дифференцирования в результате чего скорость

$$V = \frac{\sqrt{\left(X_2 - X_1\right)^2 + \left(Y_2 - Y_1\right)^2}}{\left(X_2 - X_1\right)}, \qquad (2)$$

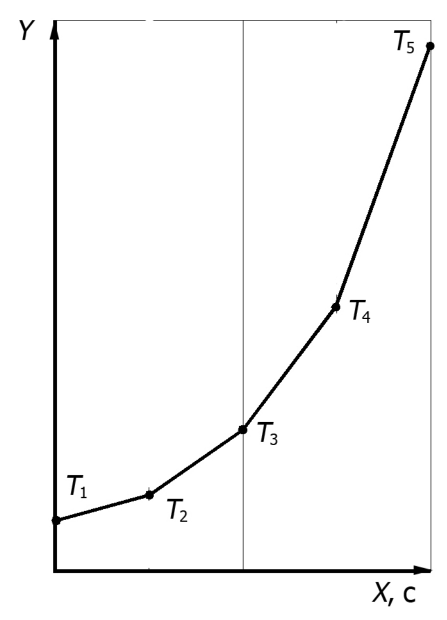


Рис. 1. График «пройденного пути» (фрагмент)

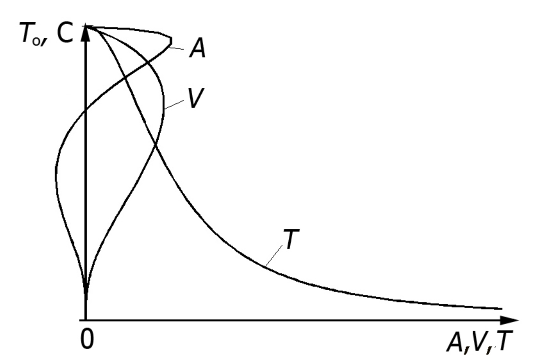


Рис.2. Термограмма охлаждения и ее производные – скорость и охлаждение:
T – термограмма охлаждения образца;
V – график скорости охлаждения;
A – ускорение охлаждения

Кроме этого, в процессе эксперимента программа одновременно позволяла формировать обменный DXF-файл, который затем можно было перенести в какой-либо графический редактор, например AutoCAD, для дальнейшей обработки, сравнения, анализа, вывода графика на бумажный носитель и т.д. Такая методика и созданная для нее программа могут быть использованы, например, при проведении исследования охлаждающей способности закалочных сред, регистрации развития трещины методом электропотенциалов и других процессов.

Наглядным примером применения такой методики служат экспериментальные данные, полученные с термопары в процессе охлаждения (рис.2).

Разработанная методика была применена для исследования кинетики разрушения при развитии усталостной трещины в термически обработанных призматических образцах (рис.3).

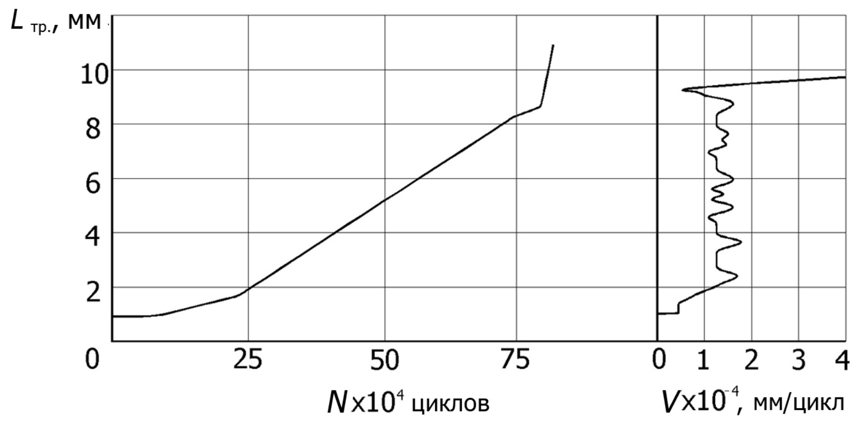


Рис.3. Кинетика развития усталостной трещины и ее производная – скорость V

С другой стороны, можно проводить и интегрирование графика, что позволяет получать площадь фигуры, ограниченной кривой, характеризующей исследуемый процесс. Так, при интегрировании элементарного участка «пути» получается следующая площадь:

$$S = (X_1 - X_0)\ Y_1, \tag{3}$$

где X_0, X_1, Y_1 – координаты соответственно предыдущей и последующей точек измерения (рис.4).

Для реализации этого была разработана программа, позволяющая выполнять процесс графического интегрирования графика «пути».

```
200 'Подпрограмма построения графика
'разрушения образца и определения работы
'зарождения Az и развития Ap трещины
    Line (XX,YY)-(x,y),15 : if regim=1 goto 202
    XS=XX: YS=YY: XF=x: YF=y: gosub 50
202 Si=(y+YY)/2*(x-XX)
    if y>YY then 204 else 206
206 Ap=Ap+Si
208 XX=x: YY=y:
204 Az=Az+Si
 Return
```

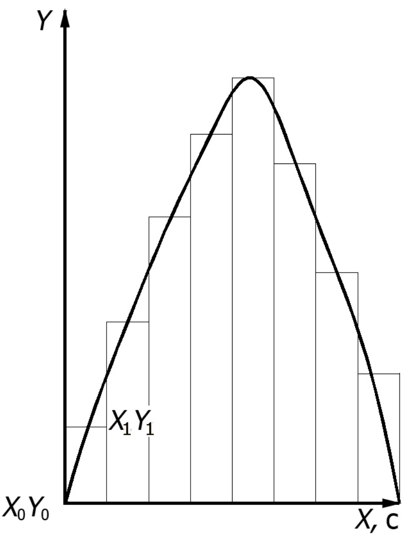


Рис.4. Формирование элементарных участков площади диаграммы

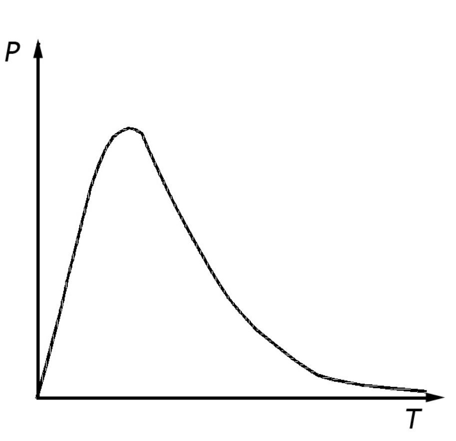


Рис.5. Диаграмма разрушения образца при испытаниях на динамический изгиб

В процессе работы этой программы каждый элементарный участок пути дает значения площади, которые затем суммируются и по окончании процесса получается результат – вся площадь под кривой, характеризующей процесс.

Данная методика обработки экспериментальных данных позволяет, например, автоматизировать процесс разделения на составляющие испытаний при ударном изгибе в целях получения значений работы зарождения и развития трещины. В этом случае в результате испытания на ударный изгиб призматического образца с надрезом на экране ЭВМ формировалось графическое изображение диаграммы разрушения в координатах «усилие – время» (рис.5). Методом графического интегрирования с помощью ЭВМ, работающей по разработанной программе, получали площади соответствующих участков диаграммы, которые использовались для дальнейших расчетов и определения составляющих ударной вязкости: работы зарождения и развития трещины по мето-

дике, описанной в литературе [6]. В процессе работы такой программы проводилось суммирование площади до максимума функции графика разрушения образца, которая соответствовала работе зарождения трещины $a_з$, а затем суммировалась следующая часть графика убывающей функции от максимума до конца процесса, которая соответствовала работе развития трещины $a_р$. Сумма $a_з$ и $a_р$ соответствовала полной работе разрушения образца.

Заключение. Приведенная методика применения ЭВМ и средств машинной графики может быть использована при изучении практически любого нестационарного процесса как в учебном, так и в научно-исследовательском практикуме и будет отличаться лишь программой, обрабатывающей экспериментальные данные.

Библиографический список

1. Гришин С.А. Применение ЭВМ, элементов математического анализа и средств машинной графики при исследовании динамических характеристик машин и механизмов / С.А. Гришин, Т.Н. Бурунова // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. Сер. Вопросы машиноведения и конструирования машин. – 1999. – С.98-100.

2. Гришин С.А. Применение компьютерной графики в научных исследованиях / С.А. Гришин, Т.Н. Бурунова // Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика: материалы междунар. межвуз. науч.-метод. конф. кафедр графических дисциплин. Вып.6. – Н.Новгород, 2001. – С. 45-46.

3. Гёлль П. Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс: пер. с франц. / П. Гёлль. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК, 1999. – 144 с.

4. Якубовский С.В. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: справочник / С.В. Якубовский, Л.И. Ниссельсон, В.И. Кулешова. – М.: Радио и связь, 1990. – 496 с.

5. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

6. Буланенко В.Ф. О разделении ударной вязкости на составляющие методом осциллографирования в координатах «усилие – время» / В.Ф. Буланенко, М.В. Пирусский // Заводская лаборатория. – 1972. – №6. – С.750-751.

Материал поступил в редакцию 15.04.2011.

References

1. Grishin S.A. Primenenie E`VM, e`lementov matematicheskogo analiza i sredstv mashinnoj grafiki pri issledovanii dinamicheskix xarakteristik mashin i mexanizmov / S.A. Grishin, T.N. Burunova // Vestn. Donsk. gos. texn. un-ta. Ser. Voprosy` mashinovedeniya i konstruirovaniya mashin. – 1999. – S.98-100. – In Russian.

2. Grishin S.A. Primenenie komp`yuternoj grafiki v nauchny`x issledovaniyax / S.A. Grishin, T.N. Burunova // Nachertatel`naya geometriya, inzhenernaya i komp`yuternaya grafika: materialy` mezhdunar. mezhvuz. nauch.-metod. konf. kafedr graficheskix disciplin. Vy`p.6. – N.Novgorod, 2001. – S. 45-46. – In Russian.

3. Gyoll` P. Kak prevratit` personal`ny`j komp`yuter v izmeritel`ny`j kompleks: per. s francz. / P. Gyoll`. – 2-e izd., ispr. – M.: DMK, 1999. – 144 s. – In Russian.

4. Yakubovskij S.V. Cifrovy`e i analogovy`e integral`ny`e mikrosxemy`: spravochnik / S.V. Yakubovskij, L.I. Nissel`son, V.I. Kuleshova. – M.: Radio i svyaz`, 1990. – 496 s. – In Russian.

5. Korn G. Spravochnik po matematike (dlya nauchny`x rabotnikov i inzhenerov) / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1973. – 832 s. – In Russian.

6. Bulanenko V.F. O razdelenii udarnoj vyazkosti na sostavlyayushhie metodom oscillografirovaniya v koordinatax «usilie – vremya» / V.F. Bulanenko, M.V. Pirusskij // Zavodskaya laboratoriya. – 1972. – #6. – S.750-751. – In Russian.

APPLICATION TECHNIQUE OF COMPUTER GRAPHICS FOR NONSTEADY PROCESSES RESEARCH IN MODERN MATERIAL SCIENCE

V.N. PUSTOVOIT, S.A. GRISHIN, M.V. ZAITSEVA
(Don State Technical University)

The application technique of computer graphics for processing the experimental data in the mode of real time is presented. The data are received in the research practice of modern material science.
Keywords: *technique, computer graphics, research and processing of results of nonsteady processes.*

УДК 621.833.6

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОВМЕЩЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ ОПОР КАЧЕНИЯ ВОДИЛА ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ТИПА 2K-V

С.О. КИРЕЕВ, Б.Н. ВАСИЛЬЕВ
(Донской государственный технический университет)

Изложен метод определения базовой динамической радиальной грузоподъемности, динамической эквивалентной радиальной нагрузки и нормативной долговечности совмещенных конических опор качения водила в планетарной передаче 2K-V с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением на второй ступени. Данные опоры используются при невозможности применения стандартных конических подшипников качения вследствие ограничения габаритных размеров изделия.
Ключевые слова: *планетарно-цевочная передача, коническая опора качения, несущая способность.*

Введение. С начала прошлого века за рубежом в приводах различных промышленных объектов получили признание и широкое применение планетарно-цевочные передачи с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением, выполненные по схеме K-H-V, с неподвижным цевочным колесом и двумя параллельно работающими эпициклоидными сателлитами. Дальнейшее развитие эти планетарные передачи получили в редукторах фирмы «Sier Bath», в которых к передаче K-H-V была добавлена эвольвентная планетарная ступень с ведущей центральной шестерней [1]. Эвольвентные сателлиты в ней располагались на валах параллельных кривошипов, а водило являлось выходным звеном. По предложению В.Н. Кудрявцева этой передаче присвоено условное обозначение 2K-V. Отличительной особенностью передачи 2K-V является высокая степень упаковки всех деталей, компактность, наличие самоторможения и возможность реализации передаточного отношения от 20 до 500 в одной ступени. В настоящее время эти передачи широко применяются в приводах звеньев промышленных роботов (например, антропоморфные сварочные роботы фирмы «Kuka»).

Наличие нескольких двухэксцентриковых валов дает возможность распределить поток мощности по нескольким направлениям, получить оптимальный вариант распределения нагрузки между эпициклоидными и эвольвентными сателлитами и уменьшить нагрузки, действующие на опорные подшипники. Наличие в данной схеме быстроходной эвольвентной ступени создает благоприятные условия для значительного увеличения передаточного отношения редуктора и также способствует улучшению режима работы подшипниковых узлов.

Однако малые габариты подобного типа редукторов, необходимость применения разнотипных подшипников качения с различной статической и динамической грузоподъемностью, увеличение их количества резко снижают, а в некоторых случаях делают даже невозможным применение в проектируемых подшипниковых узлах серийно выпускаемых стандартных подшипников качения. Это требует индивидуального подхода к выбору типа и конструкции каждого подшипникового узла, входящего в проектируемый редуктор.

Расчет несущей способности совмещенных конических опор качения водила. На рис. 1 показана кинематическая схема одного из вариантов исполнения планетарно-цевочного редуктора, выполненного по трехваловой схеме с быстроходной эвольвентной передачей 3, 1 (на схеме показаны только два эксцентриковых вала 8 из трех). Крутящий момент в данной конструкции снимается с водила 10, которое дополнительно нагружено осевой силой F_H и опрокидывающим моментом M_o (рис.2), действующими со стороны исполнительного устройства. Их комплексное действие на водило, приводит к созданию радиальной и осевой нагрузки на опору 5, которые определяют ее тип и необходимую динамическую грузоподъемность. Жесткие требования к габаритам и массе редуктора в данном случае приводят к необходимости совместного изготовления

внутреннего кольца подшипника и корпуса водила, а также к применению нестандартного типа конических роликов.

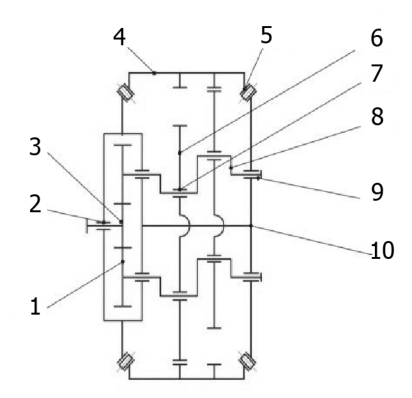


Рис.1. Кинематическая схема планетарного редуктора 2K-V с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением: 1 – колесо зубчатое эвольвентной ступени; 2 – опорный подшипник ведущего вала-шестерни; 3 – ведущий вал-шестерня; 4 – корпус редуктора; 5 – совмещенные конические опоры качения водила; 6 – эпициклоидный сателлит; 7 – опорные подшипники эпициклоидных сателлитов; 8 – вал эксцентриковый; 9 – опорные подшипники эксцентриковых валов; 10 – водило

Все основные параметры данной опоры качения, в том числе и угол контакта конического ролика с наружным кольцом, а также точки приложения радиальной и осевой нагрузок, необходимые для расчета ее несущей способности и долговечности, могут быть определены только после детальной конструктивной проработки всех деталей редуктора и его конструктивной компоновки. В связи с этим после рекомендуемой [2] разбивки общего передаточного числа проводится полный силовой расчет быстроходной эвольвентой ступени с определением ее межосевого расстояния, окружных сил, радиальных составляющих и подбором опорного подшипника 2 ведущего вала-шестерни. Расчет быстроходной ступени выполняется по моменту, равному моменту на входе вала-шестерни.

Межосевое расстояние быстроходной ступени одновременно определяет расположение эксцентриковых валов и их опорных подшипников 9, которые совместно с эксцентриковыми валами также устанавливаются в корпусе водила. Указанные подшипники нагружены окружными и радиальными силами, возникающими в зацеплении сателлитов эвольвентной ступени с шестерней и определяющими их параметры. Размеры этих подшипников оказывают весьма значительное влияние на ширину эпициклоидных сателлитов цевочной передачи 6, а также на габариты и размеры конических радиально-упорных совмещенных опор качения водила 5 и в связи с этим должны иметь минимальные габариты.

Опорные подшипники 7, несущие эпициклоидные сателлиты 6 на эксцентриковых валах 8, по данным работы [3], являются наиболее нагруженными и их конструктивные параметры принимают в соответствии с необходимыми расчетами. По полученным размерам подшипников определяют, ширину и диаметральные размеры эпициклоидных сателлитов. Его размеры оказывают также существенное влияние на конструктивное исполнение совмещенных конических опор качения водила 5.

Перед компоновкой редуктора необходимо выполнить расчет цевочной ступени и определить все ее основные параметры [4].

Общая компоновка редуктора дает возможность предварительно определить основные параметры и угол контакта конического ролика α (рис.2), которые могут быть уточнены в ходе выполнения его силового расчета. Определяющими при этом являются, как правило, заданные техническим заданием габариты корпуса редуктора, размеры водила и расположение относительно оси его вращения конических роликов, полученное при компоновке. Задают диаметр большего торца конического ролика и его длину. При этом учитывают характер и уровень действующих на опору сил, необходимость обеспечить достаточные геометрические параметры наружного кольца совмещенной опоры по условиям технологической жесткости и прочностным характеристикам, а также возможность исполнения беговых дорожек в теле водила, выполняющих роль внутренних колец совмещенных опор качения.

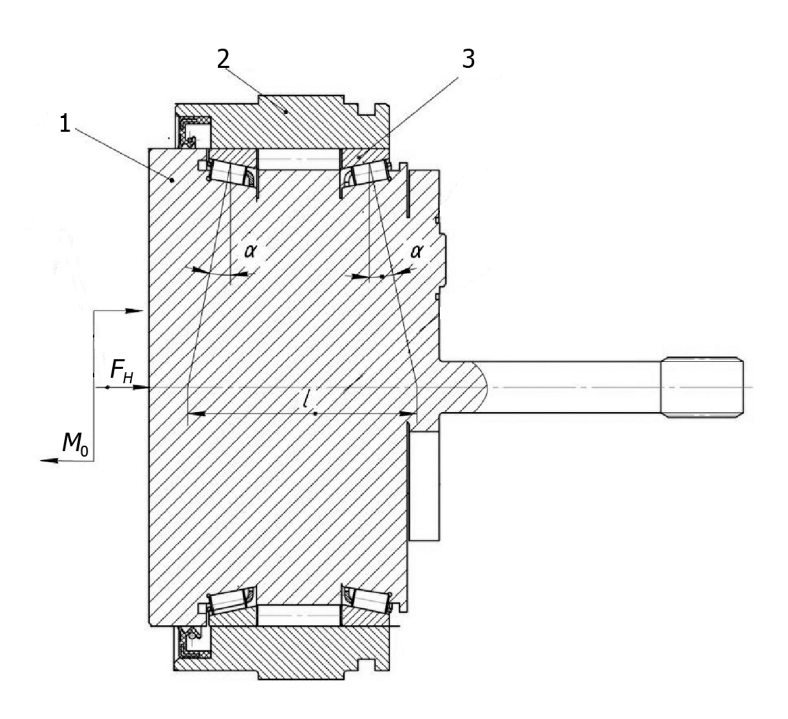


Рис.2. Общая компоновка совмещенных конических опор качения водила планетарно-цевочного редуктора 2K-V: 1 – водило в сборе с комплектующими узлами и деталями; 2 – корпус редуктора; 3 – совмещенная коническая опора качения водила; α – угол контакта конического ролика; M_o – опрокидывающий момент; F_H – внешняя осевая сила; l – расстояние между точками приложения опорных реакций

Затем на оси вращения водила определяют точки приложения опорных реакций и расстояние l между ними (рис.2). С учетом полученных размеров, строят схему нагружения совмещенных конических опор качения водила (рис.3) и рассчитывают радиальные и осевые нагрузки, действующие в опорных узлах.

Значения показанных на расчетной схеме радиальных сил, действующих в опорах от опрокидывающего момента, определяют по формуле:

$$F_{\text{rА}} = F_{\text{rБ}} = \frac{M_o}{l}.$$

где $F_{\text{rА}}$ и $F_{\text{rБ}}$ – радиальные опорные реакции, действующие в опорах.

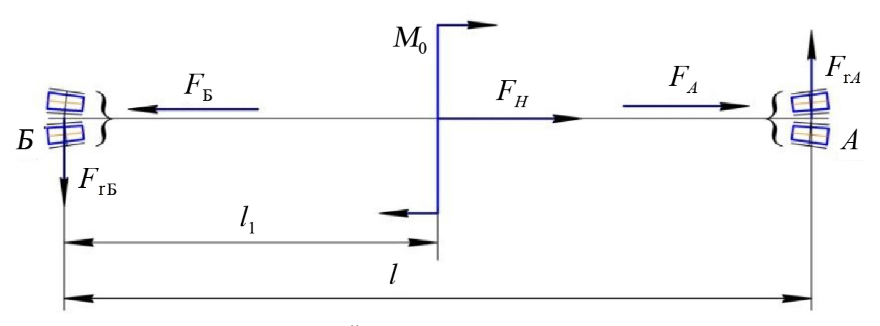


Рис. 3. Схема действия сил в опорных узлах водила

Дополнительные осевые составляющие $F_А$ и $F_Б$ зависят от радиальных сил $F_{rА}$ и $F_{rБ}$ и коэффициента осевого нагружения e и для конических радиально-упорных подшипников могут быть определены по зависимостям [5]:

$$e = 1{,}5\,\mathrm{tg}\alpha\,; \qquad F_А = 0{,}83eF_{rА}\,;\; F_Б = 0{,}83eF_{rБ}\,.$$

С учетом действия осевой силы F_H максимальным для данной схемы нагружения будет усилие в опоре А, которое выражается как

$$F_А = F_А + F_H = 0{,}83eF_{rА} + F_H.$$

Базовая динамическая радиальная грузоподъемность для каждой из совмещенных радиально-упорных конических опор качения водила может быть определена по зависимости [5]:

$$C_r = b_m f_c \left(iL_{W_e}\cos\alpha\right)^{7/9} Z^{3/4} D_{W_e}^{29/27}\,,$$

где C_r – базовая динамическая радиальная грузоподъемность, Н; b_m – коэффициент, характеризующий свойства стали с учетом способа ее изготовления (для конических роликов b_m=1,1); f_c – коэффициент, зависящий от геометрии деталей подшипника, точности их изготовления и материала; i – число рядов роликов в подшипнике; L_{We} – длина ролика для расчета грузоподъемности, мм; Z – число роликов в однорядном подшипнике; D_{We} – диаметр ролика, мм.

Коэффициент f_c определяется по табличным данным в зависимости от отношения $\dfrac{D_{W_e}\cos\alpha}{D_{pW}}$ [5], где D_{pW} – диаметр окружности центров комплекта роликов, мм. Например, при значении отношения $\dfrac{D_{W_e}\cos\alpha}{D_{pW}}$, равном 0,0438 для разработанного варианта планетарной передачи 2K-V с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением, имеющего обозначение ПЦР 3–36(6), коэффициент f_c составляет 64,09.

Динамическая эквивалентная радиальная нагрузка для наиболее нагруженной опоры А при $\alpha \neq 0$ определяется по формуле [5]:

$$P = (XVF_r + YF_А)K_б K_т,$$

где P – эквивалентная радиальная нагрузка, Н; X и Y – коэффициенты радиальной и осевой нагрузки. Если $F_А/(VF_r) \le e$, то X=1, Y=0; если $F_А/(VF_r) > e$, то X=0,4, $Y = 0{,}4\,\mathrm{ctg}\alpha$; V – коэффициент вращения; F_r – радиальная нагрузка и $F_А$ – максимальная осевая нагрузка, действующие на опору А, Н; $K_б$ – коэффициент безопасности, принимаемый при умеренных перегрузках до 150% от 1,3 до 1,8; $K_т$ – температурный коэффициент, принимаемый при температуре до 100 °С равным 1.

Полученные значения динамической грузоподъемности C и эквивалентной радиальной нагрузки P используют для определения ресурса подшипника [5]:

$$L_h = \frac{10^6}{60n}\left(\frac{C}{P}\right)^{10/3},$$

где L_h – долговечность подшипника, ч; n – частота вращения водила, мин$^{-1}$.

Заключение. Получаемое значение долговечности рассматриваемого подшипника сравнивают с требуемой и, в случае несоответствия, уточняют параметры конического ролика и угол контакта α с последующим повторением силового расчета и определением ресурса работы подшипника с уточненными параметрами. По подобной методике могут быть определены параметры и других совмещенных опор качения, установка в которых стандартных подшипников по тем или иным причинам оказывается невозможной.

Библиографический список

1. Киреев С.О. Структура, кинематика и геометрия планетарных передач с внецентроидным цевочным зацеплением / С.О. Киреев, В.Н. Ковалев. – Новочеркасск: НГТУ, 1995. – 98 с.
2. Киреев С.О. Кинематический синтез гаммы планетарных передач / С.О. Киреев, Н.В. Бабец // Основы конструирования машин: сб. науч. тр. – Новочеркасск, 1994. – С.73-79.
3. Киреев С.О. Силовой анализ планетарной 2K-V передачи / С.О. Киреев, В.Н. Ковалев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 1993. – №3-4. – С.45-50.
4. Киреев С.О. Параметрический синтез гаммы передач 2K-V на стадии эскизного проектирования / С.О. Киреев, В.Н. Ковалев, В.П. Степанов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1993. – №5. – С.83-89.
5. Перель Л.Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник / Л.Я. Перель, А.А. Филатов. – М.: Машиностроение, 1992. – 450 с.

Материал поступил в редакцию 16.05.2011.

References

1. Kireev S.O. Struktura, kinematika i geometriya planetarny`x peredach s vnecentroidny`m cevochny`m zacepleniem / S.O. Kireev, V.N. Kovalyov. – Novocherkassk: NGTU, 1995. – 98 s. – In Russian.
2. Kireev S.O. Kinematicheskij sintez gammy` planetarny`x peredach / S.O. Kireev, N.V. Babecz // Osnovy` konstruirovaniya mashin: sb. nauch. tr. – Novocherkassk, 1994. – S.73-79. – In Russian.
3. Kireev S.O. Silovoj analiz planetarnoj 2K-V peredachi / S.O. Kireev, V.N. Kovalyov // Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Texn. nauki. – 1993. – #3-4. – S.45-50. – In Russian.
4. Kireev S.O. Parametricheskij sintez gammy` peredach 2K-V na stadii e`skiznogo proektirovaniya / S.O. Kireev, V.N. Kovalyov, V.P. Stepanov // Problemy` mashinostroeniya i nadyozhnosti mashin. – 1993. – #5. – S.83-89. – In Russian.
5. Perel` L.Ya. Podshipniki kacheniya. Raschyot, proektirovanie i obsluzhivanie opor: spravochnik / L.Ya. Perel`, A.A. Filatov. – M.: Mashinostroenie, 1992. – 450 s. – In Russian.

CAPACITY RATING OF INTEGRATED CONE ROLLING-CONTACT BEARINGS OF 2K-V PLANETARY PIN-TOOTH GEAR

S.O. KIREYEV, B.N. VASILYEV
(Don State Technical University)

The estimation method for the basic dynamic radial bearing capacity, the dynamic equivalent radial load and the specified endurance of the integrated cone rolling-contact bearings of the 2K-V planetary pin-tooth gear with the off-centroid internal pin-tooth gear on the second stage is presented. These bearings are applicable in case where no standard cone rolling bearings can be used due to the dimensional specifications of the device.
Keywords: *planetary pin-tooth gear, cone bearing, carrying capacity.*

УДК 621.828.3

ПРОЕКТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНЕРЦИОННОЙ СИММЕТРИИ (КОНСТРУКТИВНОЙ УРАВНОВЕШЕННОСТИ) РОТАЦИОННОГО АГРЕГАТА

О.О. ПОЛУШКИН
(Донской государственный технический университет)

Рассмотрены и формализованы для решения на ЭВМ задачи анализа неуравновешенности ротационного агрегата от установки его периферийных рабочих элементов (ножей, молотков и т.п.) и проектного синтеза его инерционно-симметричной (уравновешенной) конструкции.
Ключевые слова: *ротационный агрегат, конструктивная уравновешенность.*

Введение. Задачи анализа и синтеза инерционно-симметричного ротационного агрегата стоят первыми при проектировании любых машин ротационного действия. Накоплен значительный опыт их решения посредством корректировки локальных дисбалансов, обусловленных наличием в конструкции ротационного агрегата инерционно-несимметричных (эксцентричных) элементов (кулачка, флажка отметчика оборотов и т.п.).

На кафедре «Теория механизмов и машин» ДГТУ эти задачи решены и для винтовой цилиндрической пружины, ось которой совпадает с осью ротора [1]. Для нее обоснована невозможность создания уравновешенной конструкции, поэтому на стадии проектирования ротационного агрегата с такой пружиной необходимо априори вводить корректирующие дисбалансы, устраняющие неуравновешенность пружины, характеристики которой определяют по полученным соотношениям через конструктивные параметры пружины.

Вместе с тем такие задачи не решены для ротационных агрегатов, представляющих собой рабочие органы машин, которые, в отличие от агрегатов контрприводного типа, имеют рабочие элементы (например, ножи ротационных измельчающих и режущих аппаратов, молотки дробилок и т.п.). Как правило, такие элементы имеют одинаковые номинальные значения массы m_0 и радиуса R_0 расположения центров масс каждого из них на собранном и установленном на машине агрегата. Поэтому значения локальных дисбалансов $\overline{D}_i$ от установки на роторе каждого i-го рабочего элемента

$$D_i = D_0 = m_0 R_0 = \mathrm{const} .$$

Постановка задачи. Для проектного обеспечения инерционной симметрии создаваемого ротационного рабочего органа полная совокупность локальных дисбалансов от установки всех его рабочих элементов должна быть конструктивно уравновешена. Это будет иметь место, если в каждой j-й плоскости, перпендикулярной оси вращения агрегата, будет установлено $n_j \geq 2$ рабочих элементов с обеспечением условия инерционной симметрии их расположения, т.е.

$$\overline{D}_j = \sum_{i=1}^{n_j} \overline{D}_{ij} = \sum_{i=1}^{n_j} D_0 e^{i\varphi_i} = D_0 \sum_{i=1}^{n_j} e^{i\varphi_i} = 0 ,$$

или (1)

$$\sum_{i=1}^{n_j} \cos\varphi_i = 0 ; \quad \sum_{i=1}^{n_j} \sin\varphi_i = 0 , \quad j = 1,\dots,n_k ,$$

где φ_i – углы расположения центров масс n_j рабочих элементов в плоскости j их установки.

Эти условия выполняются, если все $n_j > 1$ одинаковых рабочих элементов, установленных в каждой плоскости $j = 1,...,n_k$ ротационного агрегата на расстояниях R_0 от его оси, равноудалены друг от друга на угол $\varphi_0 = 2\pi / n_j$. При этом $\varphi_i = (i-1)\varphi_0$, $i = 1,...,n_j$.

Как правило, n_j инвариантно относительно j, однако в дальнейших выкладках допускается его вариация.

Дополнительные технологические и эксплуатационные требования к конструкции создаваемого ротационного рабочего органа машины могут потребовать такого размещения его рабочих элементов, которое не обеспечивает выполнение условий (1). Так, сокращение материалоемкости агрегата и исключение дублирования функций рабочих элементов за оборот ротора заставляют проектировщика размещать рабочие элементы по одному в каждой из плоскостей $j = 1,...,n_k$ их расположения, перпендикулярных оси ротора. Для увеличения плавности вращения (ликвидации ударов при работе) проектировщики располагают рабочие элементы ротационных агрегатов на цилиндрической поверхности не по ее образующей (параллельно оси ротора), а по отрезку спирали с обеспечением полного перекрытия.

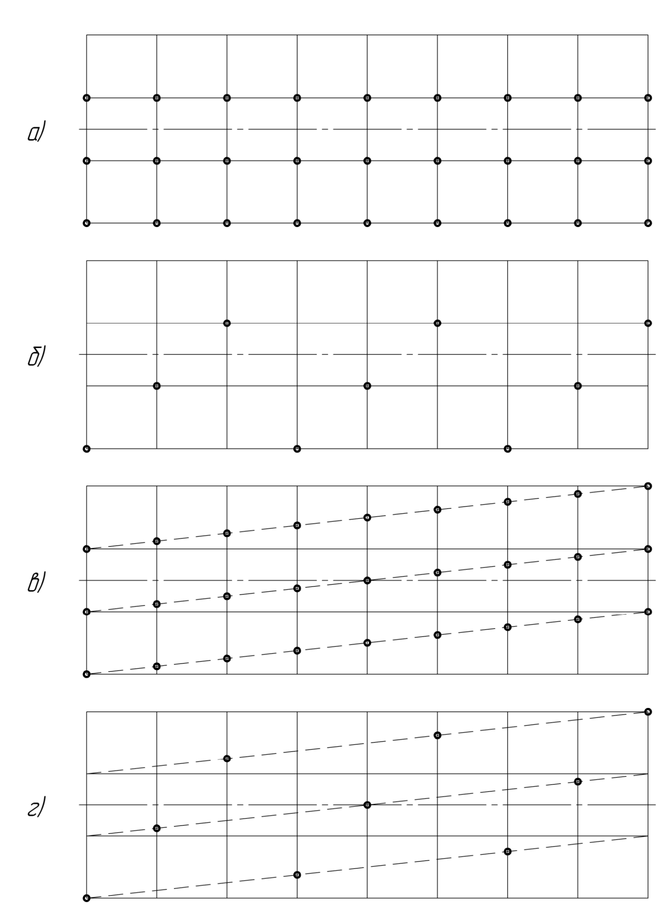


Рис.1. Варианты схем установки рабочих элементов (•) на ротационном агрегате при n_k=9, n_j=3

На развертках представлены различные варианты установки рабочих элементов на цилиндрической поверхности ротационного агрегата при числе рядов их установки $n_j = 3$ вдоль оси агрегата и числе плоскостей $n_k = 9$, перпендикулярных этой оси и содержащих рабочие элементы (рис.1). При этом, в отличие от рис.1, *а*, удовлетворяющего условиям (1), вариант схемы установки на рис.1, *б* не обеспечивает инерционной симметрии расположения рабочих элементов, хотя и

позволяет в три раза сократить их число без дублирования функций за оборот ротора. Схемы установки на рис.1, *в*, *г* обеспечивают повышенную плавность вращения агрегата при работе посредством размещения рабочих элементов по отрезку винтовой линии с полным перекрытием. Если при этом схема установки на рис.1, *в* отвечает условиям (1) инерционной симметрии размещения рабочих элементов агрегата, то схема установки на рис.1, *г*, обеспечивая снижение материалоемкости агрегата, не отвечает этим условиям.

Представленные варианты размещения рабочих элементов (см. рис.1) не являются исчерпывающими даже для $n_j = 3$, $n_k = 9$. Творческая мысль проектировщика, стремящегося обеспечить наибольшую эффективность создаваемого ротационного рабочего органа при его изготовлении и в процессе эксплуатации и потому принимающего в учет множество условий и требований к его конструкции, не связанных с ее уравновешенностью, может привести к необходимости нетривиального размещения рабочих элементов в n_j рядах и n_k плоскостях, перпендикулярных оси ротора, по самым различным схемам. Поэтому для каждой такой схемы необходимо оценивать инерционную симметрию размещения рабочих элементов и, если условия (1) не выполняются, находить главный вектор $\bar{D}_{\text{ст}}$ и главный момент $\bar{M}_D$ конструктивных дисбалансов от принятой схемы размещения рабочих элементов и на проектной стадии предусмотреть их корректировку.

Решение задачи. Рассмотрим схему с произвольным размещением рабочих элементов на цилиндрической поверхности ротационного агрегата в $i = 1,...,n_j$ равноотстоящих по окружности рядах и в $j = 1,...,n_k$ равноотстоящих вдоль оси ротора плоскостях, перпендикулярных этой оси. Обобщенная схема размещения рабочих элементов ротационного агрегата и его развертка для случаев их расположения на образующей цилиндрической поверхности (рабочие элементы обозначены как ●) и на отрезке спирали (рабочие элементы обозначены как **O**) представлена на рис.2. Для отсчета углов φ_i положения рабочих элементов на окружности ротора ввели ось x (рис.2, *а*) так, чтобы эти углы отсчитывались против часовой стрелки. В этом же направлении должен осуществляться и отсчет углов поворота спирали.

Введем идентификатор u, определяющий принятый проектировщиком характер размещения рабочих элементов вдоль оси агрегата. При их размещении по образующей цилиндрической поверхности (элементы ● на рис.2) u=0; при размещении по отрезку спирали с единичным перекрытием (элементы **O** на рис.2) u=1. Тогда угол установки рабочего элемента в i-м ряду j-й плоскости приведения, перпендикулярной оси ротора, определяется как

$$\varphi_{ij} = \frac{2\pi}{n_j}(i-1) + u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}. \tag{2}$$

Введем матрицу $\left[D_{ij}\right]$ размера $n_j \times n_k$ размещения рабочих элементов на цилиндрической поверхности ротора, которая строится по ее развертке. Если в i-м ряду j-й плоскости размещен рабочий элемент, то элемент i-й строки j-го столбца матрицы $\left[D_{ij}\right]$ принимается равным единице. В противном случае (рабочий элемент отсутствует) этот элемент матрицы $\left[D_{ij}\right]$ полагается равным нулю. Так, для варианта схемы на рис.1, *а* эта матрица будет иметь вид:

$$\left[D_{ij}\right] = D_0\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

при $u=0$; для схемы на рис.1, *в* эта матрица будет иметь тот же вид при $u=1$. Для схемы на рис.1, *б* эта матрица представляется как

$$\left[D_{ij}\right]=D_0\begin{bmatrix}1&0&0&1&0&0&1&0&0\\0&1&0&0&1&0&0&1&0\\0&0&1&0&0&1&0&0&1\end{bmatrix}$$

при $u=0$; для схемы на рис.1, *г* эта матрица будет иметь такой же вид при $u=1$.

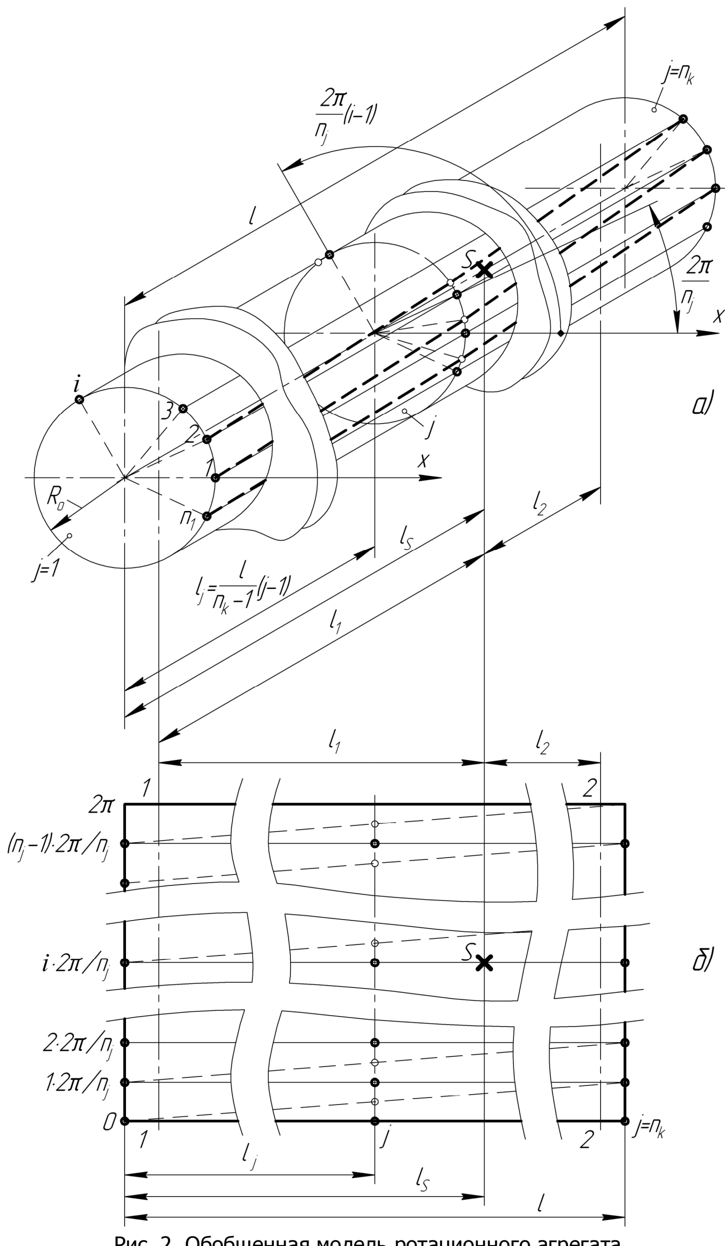


Рис. 2. Обобщенная модель ротационного агрегата
с рабочими элементами (•) или (o) (*а*) и его развертка (*б*)

Используя рис.2, находим проекцию на ось x дисбалансов в j-й плоскости приведения от установленных в этой плоскости рабочих элементов агрегата для общего случая $u=1$:

$$D_x^j=\sum_{i=1}^{n_j}D_i\cos\varphi_{ij}\ ,$$

что с учетом (2) позволяет получить:

$$D_x^j = \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1) + u\frac{2\pi}{n_j}\cdot\frac{j-1}{n_k-1}\right].$$

Суммируя D_x^j по всем плоскостям приведения, находим проекцию на ось *x* главного вектора дисбалансов агрегата от установки его рабочих элементов:

$$D_x = \sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1) + u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right]. \quad (3)$$

Аналогичным образом определяется проекция на ось y главного вектора дисбалансов агрегата от его рабочих элементов:

$$D_y = \sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1) + u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right]. \quad (4)$$

Значение $D_{\text{ст}}$ и угол φ_D главного вектора дисбалансов агрегата от установки его рабочих элементов определяются как

$$D_{\text{ст}} = \sqrt{D_x^2 + D_Y^2}\ ; \qquad \varphi_D = \text{sign}D_y \arccos\frac{D_x}{D_{\text{ст}}}. \quad (5)$$

Проекции на ось x и y главного момента дисбалансов агрегата от установки его рабочих элементов

$$M_{D_x} = \sum_{j=1}^{n_k}\left[\frac{l}{n_k-1}(j-1) - l_s\right]\sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1) + u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right], \quad (6)$$

$$M_{D_y} = \sum_{j=1}^{n_k}\left[l_s - \frac{l}{n_k-1}(j-1)\right]\sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1) + u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right], \quad (7)$$

где l_S – расстояние от первой плоскости приведения $(j=1)$ до центра масс всей совокупности рабочих элементов агрегата.

Значение M_D главного момента дисбалансов от установки всех рабочих элементов агрегата и его угол φ_M определяются соотношениями:

$$M_D = \sqrt{M_{D_x}^2 + M_{D_y}^2}\ ; \quad \varphi_M = \text{sign}M_{D_y} \arccos\frac{M_{D_x}}{M_D}. \quad (8)$$

Для формализации расчетов характеристик $D_{\text{ст}}$, φ_D, M_D, φ_M неуравновешенности представим зависимости (3), (4), (6), (7), необходимые для их расчета, в матричном виде. При этом учитываем, что

$$D_x = \sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \cos\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right]\cos\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right] -$$
$$-\sum_{j=1}^{n_k} \sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right]\sin\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right] =$$
$$= \sum_{j=1}^{n_k}\cos\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right]\sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right] -$$
$$-\sum_{j=1}^{n_k}\sin\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right]\sum_{i=1}^{n_j} D_i \sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right]. \quad (9)$$

Аналогично получим:

$$D_y=\sum_{j=1}^{n_k}\cos\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k}\right]\sum_{i=1}^{n_j}\sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right]+ +\sum_{j=1}^{n_k}\sin\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right]\sum_{i=1}^{n_j}D_i\cos\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right], \quad (10)$$

$$M_{D_x}=\sum_{j=1}^{n_j}\left[\frac{l}{n_k-1}(i-1)-l_s\right]\cos\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k}\right]\sum_{i=1}^{n_j}\sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right]+ +\sum_{j=1}^{n_j}\left[\frac{l}{n_k-1}(j-1)-l_s\right]\sin\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right]\sum_{i=1}^{n_j}D_i\cos\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right], \quad (11)$$

$$M_{D_y}=-\sum_{j=1}^{n_j}\left[\frac{l}{n_k-1}(i-1)-l_s\right]\cos\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k}\right]\sum_{i=1}^{n_j}D_i\cos\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right]+ +\sum_{j=1}^{n_j}\left[\frac{l}{n_k-1}(j-1)-l_s\right]\sin\left[u\frac{2\pi}{n_j}\frac{j-1}{n_k-1}\right]\sum_{i=1}^{n_j}D_i\sin\left[\frac{2\pi}{n_j}(i-1)\right]. \quad (12)$$

Вводя матрицы

$\left[\varphi_i\right]=\frac{2\pi}{n_j}\left[0\ \ 1\ \ 2\ \ \ldots\ \ i\ \ \ldots\ \ (n_j-1)\right]$ – размера ($1\times n_j$),

$\left\{\varphi_j\right\}=u\frac{2\pi}{n_j(n_k-1)}\left\{0\ \ 1\ \ 2\ \ \ldots\ \ j\ \ \ldots\ \ (n_k-1)\right\}$ – размера ($n_k\times 1$),

$\left[l_j\right]=\frac{l}{n_k-1}\mathrm{diag}\left[0\ \ 1\ \ 2\ \ \ldots\ \ j\ \ \ldots\ \ (n_k-1)\right]$ – размера ($n_k\times n_k$),

$[E_{n_k}]$ – диагональная единичная матрица размера ($n_k\times n_k$),

а также рассчитав матрицы $[\cos\varphi_i]$, $[\sin\varphi_i]$, $\{\cos\varphi_j\}$, $\{\sin\varphi_j\}$, проекции $\overline{D_{\text{ст}}}$ и $\overline{M_D}$ на координатные оси запишем в виде:

$$D_x=[\cos\varphi_i][D_{ij}]\{\cos\varphi_j\}-[\sin\varphi_i][D_{ij}]\{\sin\varphi_j\}, \quad (13)$$

$$D_y=[\sin\varphi_i][D_{ij}]\{\cos\varphi_j\}+[\cos\varphi_i][D_{ij}]\{\sin\varphi_j\}, \quad (14)$$

$$M_{D_x}=[\sin\varphi_i][D_{ij}]([l_j]-l_s[E_{n_k}])\{\cos\varphi_j\}+ +[\cos\varphi_i][D_{ij}]([l_j]-l_s[E_{n_k}])\{\sin\varphi_j\}, \quad (15)$$

$$M_{D_y}=-[\cos\varphi_i][D_{ij}]([l_j]-l_s[E_{n_k}])\{\sin\varphi_j\}+ +[\sin\varphi_i][D_{ij}]([l_j]-l_s[E_{n_k}])\{\sin\varphi_j\}. \quad (16)$$

В случае $u=0$ имеем $\{\cos\varphi_j\}=\{E_{n_k}\}$ – единичная матрица-столбец размера ($n_k\times 1$); $\{\sin\varphi_j\}$ – нулевая матрица-столбец размера ($n_k\times 1\sqrt{2}$) и уравнения (13)-(16) для расчета проекций $\overline{D_{\text{ст}}}$, $\overline{M_D}$ на координатные оси существенно упрощаются:

$$D_x=[\cos\varphi_i][D_{ij}]\{E_{n_k}\},$$
$$D_y=[\sin\varphi_i][D_{ij}]\{E_{n_k}\},$$
$$M_{D_x}=[\sin\varphi_i][D_{ij}](\{l_j\}-l_s[E_{n_k}]),$$
$$M_{D_y}=-[\cos\varphi_i][D_{ij}](\{l_j\}-l_s[E_{n_k}]), \quad (17)$$

где $\{l_j\}=[l_j]\{E_{n_k}\}=\frac{l}{n_k-1}\{0\ \ 1\ \ 2\ \ \ldots\ \ j\ \ \ldots\ \ (n_k-1)\}$ – матрица-столбец размера ($n_k\times 1$).

Значения и углы $\overline{D_{\text{ст}}}$, $\overline{M_D}$ определяются по формулам (5), (8), и если $D_{\text{ст}} \neq 0$ и (или) $\overline{M_D}$, то в конструкцию агрегата надо заранее вносить корректирующие дисбалансы в двух произвольно определенных (отстоящих от S на расстоянии l_1 и l_2 (см. рис.2)) плоскостях коррекции. Используя известные [2, 3] уравнения приведения главного вектора $\overline{D_{\text{ст}}}$ и главного момента $\overline{M_D}$ к двум дисбалансам в этих плоскостях коррекции, получаем следующий алгоритм расчета значений и углов корректирующих дисбалансов $\overline{D}_{k1}$, $\overline{D}_{k2}$ и значений корректирующих масс m_{k1}, m_{k2}:

$$D_{1x} = \frac{D_{\text{ст}} l_2 \cos\varphi_D + M_D \sin\varphi_M}{l_1 + l_2}, \qquad D_{1y} = \frac{D_{\text{ст}} l_2 \sin\varphi_D - M_D \cos\varphi_M}{l_1 + l_2},$$

$$D_{k1} = \sqrt{D_{1x}^2 + D_{1y}^2}, \qquad \varphi_{k1} = \pm\pi + \text{sign}(D_{1y}) \arccos\frac{D_{1x}}{D_{k1}} \leq 2\pi,$$

$$D_{2x} = \frac{D_{\text{ст}} l_1 \cos\varphi_D - M_D \sin\varphi_M}{l_1 + l_2}, \quad D_{1y} = \frac{D_{\text{ст}} l_1 \sin\varphi_D + M_D \cos\varphi_M}{l_1 + l_2}, \qquad (18)$$

$$D_{k2} = \sqrt{D_{2x}^2 + D_{2y}^2}, \ \varphi_{k2} = \pm\pi + \text{sign}(D_{2y}) \arccos\frac{D_{2x}}{D_{k2}} \leq 2\pi;$$

$$m_{k1} = D_{k1} / R_{k1}, \ m_{k2} = D_{k2} / R_{k2},$$

где R_{k1}, R_{k2} – принимаемые проектировщиком радиусы установки корректирующих масс m_{k1}, m_{k2} в соответствующих плоскостях коррекции 1-1, 2-2 (рис.2, *б*) создаваемого агрегата.

Разместив на чертеже отдельные детали с массами m_{k1}, m_{k2} в соответствующих точках плоскостей 1-1, 2-2, определенных углами φ_{k1}, φ_{k2} и радиусами R_{k1}, R_{k2}, проектировщик конструктивно корректирует неуравновешенность агрегата, вносимую инерционно-несимметричной установкой его рабочих элементов. Если же предусмотрена инерционно-симметричная установка рабочих элементов с выполнением условий (1), то расчеты корректирующих дисбалансов и их размещение в конструкции создаваемого агрегата не производятся.

Приведенные соотношения являются общими, так как могут быть использованы при любом (принятом проектировщиком и обоснованном теми или иными конструктивными, технологическими или эксплуатационными причинами) размещении рабочих элементов по цилиндрической поверхности создаваемого ротационного агрегата. Это размещение учитывается конфигурацией исходно задаваемой матрицы $[D_{ij}]$, формируемой по схеме развертки, отмеченной цилиндрической поверхности, с учетом указанных замечаний.

Блок-схема алгоритма, формализующего решение задачи обеспечения инерционной симметрии проектируемого ротационного агрегата представлена на рис.3. Из пояснений к этой блок-схеме отметим следующее:

– в блоке 2 вводятся критерии t и q: $t = 1$, если агрегат имеет в своем составе детали (сборочные единицы), заведомо имеющие неуравновешенные массы (кулачки, отметчики оборотов и т.п.), при отсутствии таких деталей $t = 0$; $q = 1$, если агрегат имеет в своем составе рабочие элементы (ножи, молотки, бичи и т.п.), расположенные на периферийной цилиндрической поверхности, $q = 0$ при отсутствии таких элементов;

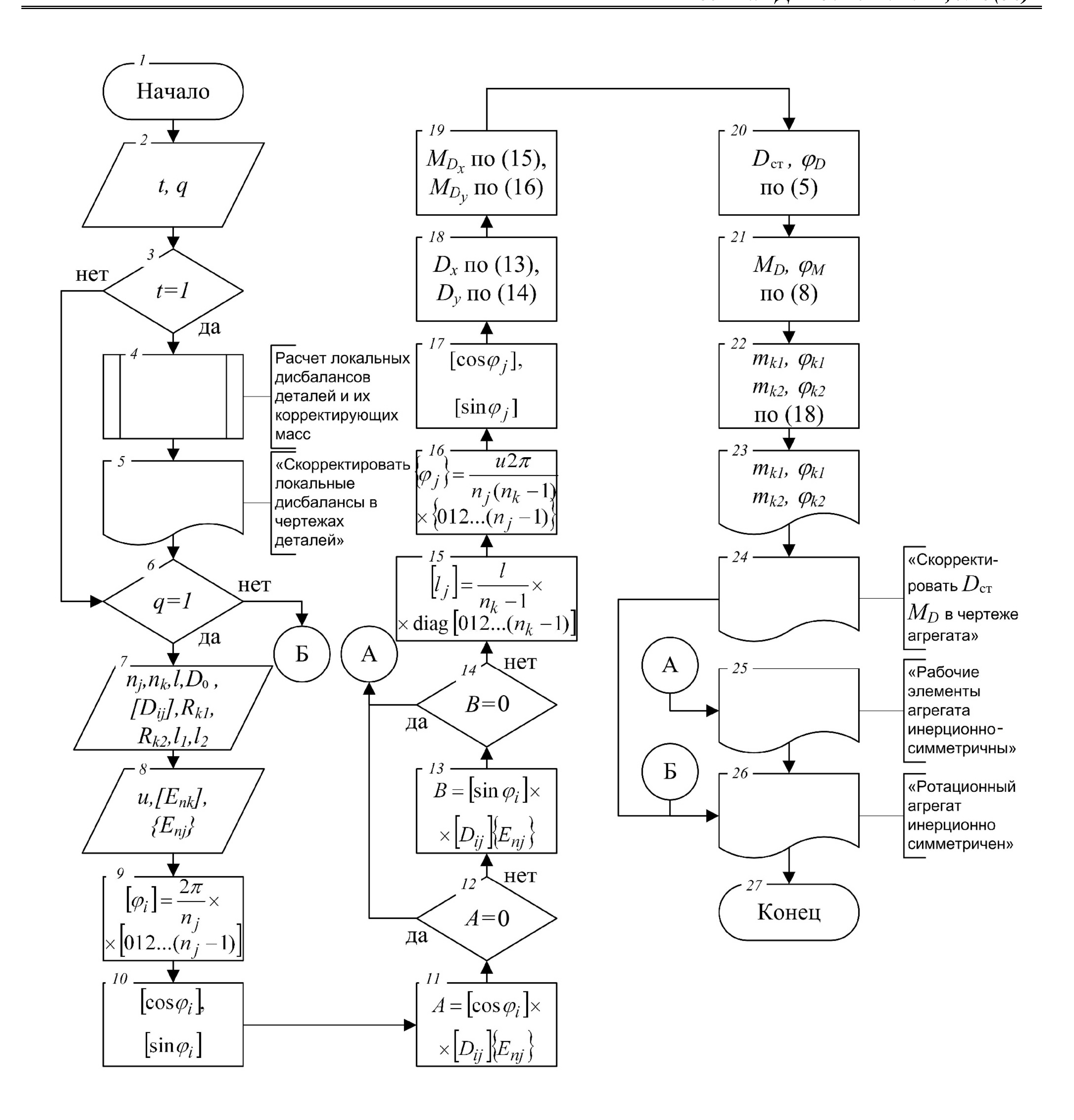


Рис.3. Алгоритм расчетов по обеспечению инерционной симметрии проектируемого ротационного агрегата

– блок 3 – условный переход, при выполнении условия которого в блоках 4, 5 осуществляется расчет и корректировка локальных дисбалансов, имеющихся у деталей (сборочных единиц) агрегата. Эти расчеты производятся по известным методикам и программным средствам, используемым в блоке 4;

– блок 6 – условный переход. При наличии у агрегата рабочих элементов ($q = 1$) в блоке 7 вводятся следующие исходные для последующих расчетов: n_j – число рядов рабочих элементов, размещенных вдоль оси агрегата; n_k – число плоскостей приведения, перпендикулярных оси агрегата, в которых устанавливаются рабочие элементы; l – расстояние между крайними плоско-

стями приведения агрегата; D_0 – значение дисбаланса, вносимого в конструкцию агрегата одним рабочим элементом, определенное выше; $[D_{ij}]$ – введенная и поясненная выше матрица размещения рабочих элементов на цилиндрической поверхности агрегата, формируемая с помощью построения развертки этой поверхности (например, см. рис.1); l_1, l_2 – осевые расстояния от принятых плоскостей коррекции 1-1, 2-2 дисбалансов рабочих элементов до центра S масс полной совокупности этих элементов (см. рис.2, *б*); R_{k1}, R_{k2} – радиусы установки корректирующих масс в плоскостях коррекции 1-1, 2-2. В блоке 8 дополнительно вводятся: значение u, определяющее способ размещения рабочих элементов вдоль оси агрегата ($u = 0$, если рабочие элементы размещены по образующей цилиндрической поверхности (см. рис.1, *а*, *б*); $u = 1$, если эти элементы размещены на отрезке спирали (см. рис.1, *в*, *г*); $[E_{n_k}]$ – диагональная единичная матрица размера ($n_k \times n_k$); $\{E_{n_k}\}$ – матрица-столбец с единичными элементами размера ($n_j \times 1$);

– в блоках 9-14 проводится оценка инерционной симметрии размещения рабочих элементов агрегата. Если условие инерционной симметрии их расположения выполняется $(A = 0,\ B = 0)$, то от блока 14 расчет переходит к блоку 25. Если это условие не выполняется (A и (или) B не обращаются в ноль), то расчет переходит к блоку 15;

– в блоках 15-22 осуществляется расчет корректирующих масс m_{k1}, m_{k2} и углов φ_{k1}, φ_{k2} их установки в плоскостях коррекции 1-1, 2-2 проектируемого агрегата, которые выдаются на печать в блоке 23;

- блок 24 содержит информацию для проектировщика о необходимости спроектировать детали агрегата массой m_{k1}, m_{k2}, которые необходимо изобразить на его чертеже на углах φ_{k1}, φ_{k2} в плоскостях 1-1, 2-2 на расстояниях R_{k1}, R_{k2} от центров масс этих деталей до оси агрегата, жестко соединив их с агрегатом;

- блоки 25, 26 представляют проектировщику информацию о результатах анализа и синтеза инерционной симметрии идеально исполненной конструкции проектируемого ротационного агрегата машины;

- блок 27 – конец расчетов.

Представленный алгоритм позволяет формализовать решение задачи проектного обеспечения конструктивной уравновешенности любого ротационного агрегата.

Заключение. Создан формализованный для использования на ЭВМ алгоритм решения задач анализа неуравновешенности и синтеза инерционно-симметричной конструкции любого ротационного агрегата, гарантирующий обеспечение его конструктивной уравновешенности. Однако это не исключает необходимости балансировки такого агрегата при его изготовлении для ликвидации неуравновешенности от технологических источников.

Библиографический список

1. Справочник по балансировке /М.Е. Левит, Ю.А. Агафонов, Л.Д. Вайнгортин [и др.]; под. общ. ред. М.Е. Левита. – М.: Машиностроение, 1992. – 464 с.

2. ГОСТ 22061-76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 136 с.

3. Полушкин О.А. Теоретические основы балансировки роторов. Типовые методы определения дисбалансов: метод. указания. Вып.1 / О.А. Полушкин, В.А. Фокин. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1994. – 29 с.

Материал поступил в редакцию 29.03.2011.

References

1. Spravochnik po balansirovke / M.E. Levit, Yu.A. Agafonov, L.D. Vajngortin [i dr.]; pod. obshh. red. M.E. Levita. – M.: Mashinostroenie, 1992. – 464 s. – In Russian.

2. GOST 22061-76. Mashiny` i texnologicheskoe oborudovanie. Sistema klassov tochnosti balansirovki. Osnovny`e polozheniya. – M.: Izd-vo standartov, 1984. – 136 s. – In Russian.

3. Polushkin O.A. Teoreticheskie osnovy` balansirovki rotorov. Tipovy`e metody` opredeleniya disbalansov: metod. ukazaniya. Vy`p.1 / O.A. Polushkin, V.A. Fokin. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 1994. – 29 s. – In Russian.

ROTOR INERTIA SYMMETRY (DESIGN BALANCE) PROJECT SUPPORT

O.O. POLUSHKIN
(Don State Technical University)

Analysis problems of rotor imbalance from its peripheral working parts (hummers, knives, etc.) installation and the specified synthesis of its inertia symmetrical (balanced) structure are considered and formalized for the computing.
Keywords: *rotor, design balance.*

УДК 621.048.6.06

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

О.А. РОЖНЕНКО, Э.Э. ТИЩЕНКО, Е.М. ТАМАРКИНА, Ю.В. КОРОЛЬКОВ
(Донской государственный технический университет)

Рассчитаны теоретико-вероятностные модели процесса единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали, съема металла и формирования качества поверхностного слоя при обработке фасонных поверхностей свободными абразивами. Установлены закономерности формирования полей скоростей и напряжений гранулированных абразивных сред при прямом компьютерном моделировании. Разработана методика проектирования технологических процессов обработки фасонных деталей, позволяющая обеспечить минимальное время обработки за счет рационального выбора характеристик рабочей среды и режимов обработки.

Ключевые слова: *моделирование процессов обработки, свободный абразив, съем металла с поверхности детали, качество поверхностного слоя, методика проектирования технологических процессов, вибрационная обработка, центробежно-ротационная обработка.*

Введение. Развитие машиностроения на современном этапе невозможно без постоянного повышения производительности труда и улучшения качества выпускаемых изделий. Для решения этих задач разрабатываются и внедряются новые методы обработки, к которым относятся и процессы обработки гибкой гранулированной абразивной средой [1]. В последнее время они находят все большее применение в различных отраслях промышленности на этапах финишной обработки благодаря широким технологическим возможностям, позволяющим обрабатывать детали с фасонными поверхностями и обеспечивать высокое качество продукции.

Высокопроизводительная обработка фасонных поверхностей является сложной технологической задачей [2]. Особые трудности вызывает обработка точных фасонных поверхностей, так как от конфигурации обрабатываемых деталей зависит доступ частиц рабочей среды к различным элементам поверхности и соответствующая интенсивность обработки. В глухих карманах, отверстиях, пазах и углублениях обработка происходит медленнее и требует более тщательного подбора размеров и форм частиц рабочей среды.

Обработка фасонных поверхностей отличается от обработки плоских и других простых поверхностей ярко выраженной нестационарностью, уровень которой оказывает существенное влияние на выбор режимов технологического процесса обработки и оборудования. Поэтому выбору технологии и оборудования должен предшествовать тщательный анализ закономерностей, свойственных процессу обработки фасонных поверхностей.

Цель исследований – установление закономерностей влияния формы и расположения фасонных поверхностей деталей на производительность и качество обработки свободным абразивом для повышения эффективности технологического процесса.

Теоретические исследования. Одной из сложностей, возникающих в процессе обработки деталей сложной формы, является обработка отверстий и внутренних поверхностей.

Обработка внутренних поверхностей деталей свободными абразивными частицами может осуществляться следующими способами.

1. Отверстие обрабатывается воздушно-абразивной или воздушно-жидкостно-абразивной струей. Для этого в обрабатываемое отверстие вводится струйный аппарат со щелевидным соплом, расположенным веером.

2. Возможно использование для зачистки отверстий таких известных процессов, как дробеструйный, гидропескоструйный, гидрокавитационный, гидрокавитационно-абразив-ный, пескоструйный, дробеметный, пневмодробеструйный, пневмошариковый, пневмопластмошариковый.

3. В полость детали подают абразивный материал и воздействуют на него направленными с противоположных сторон спиралевидными потоками энергоносителя. При этом интенсивность потоков энергоносителя изменяют синфазно.

4. В полость детали помещают гранулы между двумя уплотнителями, посредством которых рабочую среду сжимают. После этого ей сообщают возвратно-поступательные перемещения вдоль обрабатываемой детали. Среде, кроме того, могут сообщаться круговые колебания и ударные импульсы.

5. Через каналы в детали прокачивают под давлением 1,5-15 МПа суспензию.

6. В полость детали загружают абразивные частицы, которые подаются на обрабатываемые поверхности с помощью специального инструмента, закрепленного на конце вращающегося вала. Инструмент, помимо периферийных лопаток, параллельных оси вращения, содержит торцовые лопатки, наружные кромки которых образуют с периферийными тупой угол. При вращении периферийные лопатки собирают абразивные частицы, лежащие на дне обрабатываемой полости, и отбрасывают их к верхней части полости. Отразившиеся от нее частицы падают частично на торцовые лопатки, которые направляют их на боковые стенки.

7. При струйно-абразивной обработке внутренних поверхностей деталей для увеличения тангенциальной составляющей скорости движения струи (в целях повышения производительности процесса) разработана технологическая схема на основе вихревого закручивания потока суспензии.

8. Отверстие заполняют жидкостью, которая обладает свойством затвердевать в магнитном поле, воздействуют на нее этим полем, а после затвердевания отводят вместе со стружкой к сборнику стружки, где воздействие физического поля прекращается.

9. При магнитоабразивной обработке отверстий индуктор вводится в обрабатываемое отверстие с зазором, который заполняется ферроабразивным порошком и приводится во вращение вокруг своей оси и в планетарное движение. Кроме того, индуктору придается осевое колебательное движение.

10. Для обработки внутренних поверхностей деталей используется метод вибрационной обработки, при котором абразивные частицы совершают колебательное движение в вибрирующем резервуаре.

11. При центробежно-ротационной обработке отверстий абразивные частицы совершают спиралевидное движение, вовлеченные в тороидально-винтовой поток, создаваемый вращающимся вокруг вертикальной оси дном рабочей камеры.

Анализ исследований процессов вибрационной (ВиО) и центробежно-ротационной (ЦРО) обработки в среде абразива [1] показал, что многочисленные результаты, полученные исследователями этих процессов, недостаточно полно описывают процессы ВиО и ЦРО при обработке фасонных поверхностей деталей в среде свободного абразива. Большим препятствием при проектировании и внедрении техпроцессов для данных методов обработки является недостаточная изученность особенностей взаимодействия гибкой гранулированной абразивной среды с поверхностью деталей сложной конфигурации.

Проведены теоретические исследования обработки фасонных поверхностей свободным абразивом. При расчете съема металла в гранулированных рабочих средах очень важное значение имеет учет вероятности покрытия каждой точки поверхности детали пятном контакта с абразивной гранулой.

Получены аналитические зависимости для определения вероятности покрытия обрабатываемой поверхности пятнами контакта при обработке для наиболее распространенных поверхностей, таких, как плоская, цилиндрическая и коническая.

Оценка вероятности определяется зависимостью:

$$P_1 = \frac{\pi ab}{S_{\text{кв.уп}}}, \tag{1}$$

где a и b – большая и малая полуоси эллипсов контакта; $S_{\text{кв.уп}}$ – площадь квадрата упаковки.

Для плоской поверхности упаковку шаров принимаем по квадрату со стороной d, равной диаметру шара, тогда площадь единичной упаковки и вероятность P_1 определяются по формулам:

$$S_{\text{е.у.пл}} = d^2, \quad P_{1\text{пл}} = \frac{\pi ab}{d^2}. \tag{2}$$

Для цилиндрической поверхности диаметром D площадь единичной упаковки и вероятность P_1 вычисляются как

$$S_{\text{е.у.цил}} = dD \arcsin\left(\frac{d}{D+d}\right), \quad P_{1\text{цил}} = \frac{\pi ab}{dD \arcsin\left(\frac{d}{D+d}\right)}. \tag{3}$$

При определении вероятности P_1 и площади единичной упаковки для участка конической поверхности, ограниченного диаметрами минимальным $D_{\min}$ и максимальным $D_{\max}$, принимается допущение:

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\min} + D_{\max}}{2},$$

тогда

$$S_{\text{е.у.ср.кон}} = dD_{\text{ср}} \arcsin\left(\frac{d}{D_{\text{ср}}+d}\right), \quad P_{1\text{кон}} = \frac{\pi ab}{dD_{\text{ср}} \arcsin\left(\frac{d}{D_{ср}+d}\right)}. \tag{4}$$

Для сравнительной оценки влияния формы поверхности на процесс обработки воспользуемся коэффициентом формы, который определяется как отношение вероятности покрытия каждой точки плоской поверхности к вероятности покрытия каждой точки криволинейной поверхности пятном контакта:

$$k_{\text{ф}} = \frac{P_{1\text{пл}}}{P_{1\text{кр}}}. \tag{5}$$

С учетом влияния формы обрабатываемых фасонных поверхностей и их расположения установлена зависимость для расчета съема металла с поверхности детали:

$$Q = k_{\text{ф}} k_{\text{расп}} P_1 P_2 \omega t q \frac{S_{\text{дет}}}{d^2} \text{ при } S_{\text{дет}} > d^2,$$
$$Q' = k_{\text{ф}} k_{\text{расп}} P_1' P_2 \omega t q \text{ при } S_{\text{дет}} < d^2, \tag{6}$$

где $k_{\text{расп}}$ – коэффициент, учитывающий влияние расположения фасонных поверхностей; P_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию; ω – частота воздействия; t – время обработки; q – съем металла при единичном взаимодействии.

Также получены зависимости для определения времени обработки:

– на удаление дефектного слоя

$$t_{\Delta L} = \frac{16R^4 \Delta L}{\pi a b P_2 \omega V k_{\text{ф}} k_{\text{расп}}}, \tag{7}$$

где R – характерный размер абразивной гранулы; ΔL – толщина дефектного слоя; V – объем металла, удаленный при единичном взаимодействии;

– достижение установившейся шероховатости

$$t_{Ra\text{уст}} = \frac{4k_{\text{пр}} Rz_{\text{исх}} R^2}{P_1 P_2 \omega V k_{\text{ф}} k_{\text{расп}}}, \tag{8}$$

где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий вид профиля шероховатости до обработки; $Rz_{\text{исх}}$ – исходная шероховатость поверхности;

– изменение шероховатости поверхности от исходной до заданного значения

$$t = -\frac{1}{k_{\text{и}} k_{\text{ф}} k_{\text{расп}}} \ln\left(\frac{Ra_{\text{з}} - Ra_{\text{уст}}}{Ra_{\text{и}} - Ra_{\text{уст}}}\right), \tag{9}$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент интенсивности изменения шероховатости; $Ra_{\text{и}}$, $Ra_{\text{з}}$, $Ra_{\text{уст}}$ – параметр исходной, заданной и установившейся шероховатости поверхности соответственно.

Прямое компьютерное моделирование процесса. Для более тщательного изучения сущности процессов, происходящих при обработке фасонных деталей в гранулированных рабочих средах, с использованием современных методов прямого компьютерного моделирования проведены комплексные исследования динамики сложного пространственного движения абразивных гранул, детали и контейнера. Для этого применено инструментальное программное средство GranMos, использующее метод «мягких частиц» [3]. Цель компьютерного моделирования – исследование динамики объемов гранул сферической формы, ограниченных поверхностями; визуальное наблюдение потоков среды, дающее представление о протекающем процессе. Данные компьютерного моделирования позволили подтвердить адекватность применяемых теоретических моделей. Определен параметр, характеризующий интенсивность воздействия абразивных гранул на обрабатываемую деталь, – модуль сопротивления абразивному изнашиванию, который определяется по формуле:

$$\Omega = E/\Pi, \tag{10}$$

где E – плотность потока энергии движущейся абразивной среды; Π – объемный удельный съем металла.

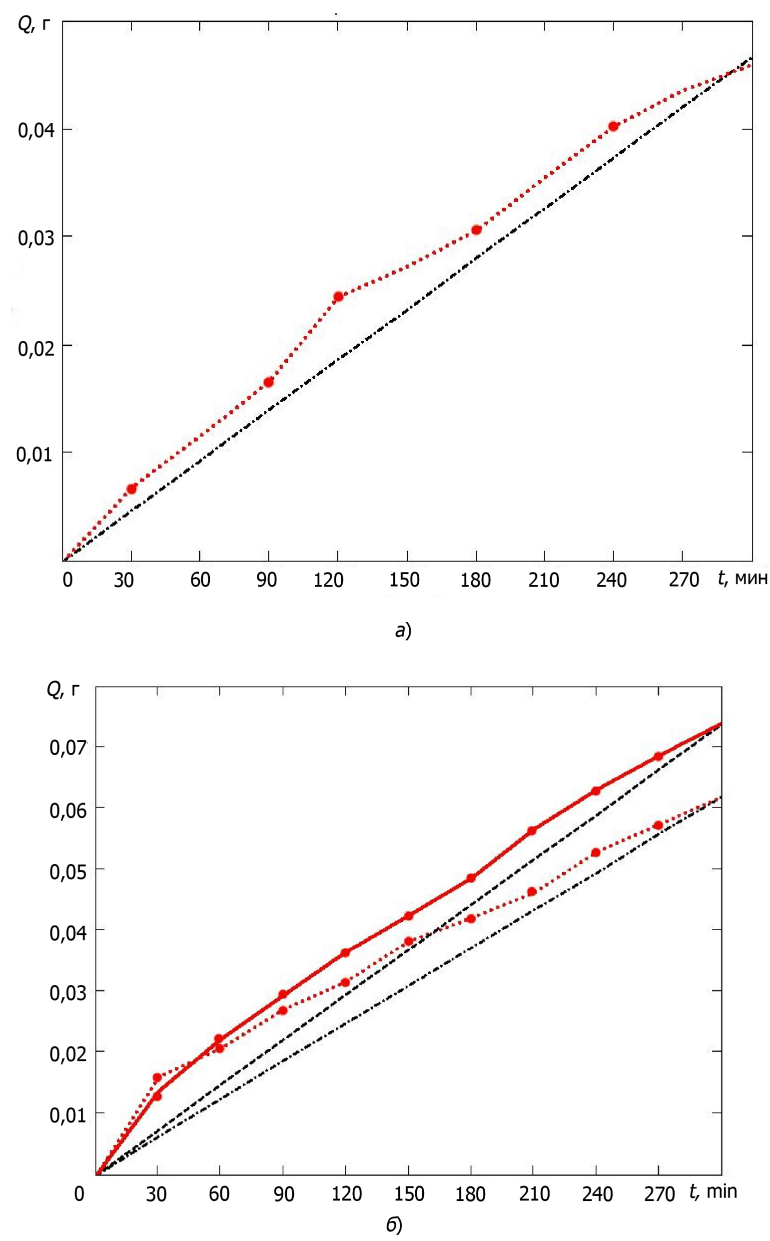
Полученные значения модуля сопротивления абразивному изнашиванию позволяют судить о целесообразности обработки внутренних фасонных поверхностей при различных сочетаниях технологических факторов.

Проведен значительный комплекс экспериментальных исследований процесса обработки фасонных поверхностей в среде свободного абразива. Для образцов использовались материалы, применяемые в общем машиностроении и авиастроении, такие, как сталь 45 и алюминиевый сплав Д16Т.

Эксперименты проводили на станках: для вибрационной обработки – УВГ4×10; для центробежно-ротационной обработки – ЦРС-10. Обработку в среде свободного абразива проводили с незакрепленными приспособлениями типа «стакан», на которых были закреплены образцы на внутренних и внешних сторонах приспособления с разной глубиной расположения от верхней кромки.

Образцы обрабатывались в абразивных средах различной зернистости 10-25 (фарфоровые шары, призмы трехгранные абразивные ПТ 15×15, конусы абразивные на полимерной и керамической связках).

Для комплексной проверки адекватности теоретических моделей удаления металла и формирования шероховатости обрабатываемой поверхности произведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований (см. рисунок). Теоретическая зависимость определения съема металла от формы обрабатываемой поверхности построена с помощью программы MathCAD. Установлено, что расхождение между результатами не превышает 20%.



Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей для определения съема металла: *а* – с плоской поверхности при ВиО (А=2,5 мм); *б* – с плоской и цилиндрической поверхности при ВиО (А=4 мм); ······ – экспериментальные значения (плоская поверхность); – · – – теоретическая зависимость (плоская поверхность); ―― – экспериментальные значения (цилиндрическая поверхность); – – – – теоретическая зависимость (цилиндрическая поверхность)

Была проведена серия экспериментальных исследований по определению основных закономерностей интенсивности процесса обработки различно расположенных поверхностей фасонных деталей методом прямого компьютерного моделирования с использованием программного комплекса GranMos, основанного на представлении гранулированной среды дискретными частицами сферической формы различных размеров и контактных свойств. Поверхность, ограничивающая резервуар со средой, моделируется совокупностью линейных сплайнов, движущихся в соответствии с заданной кинематикой.

В GranMos проведено моделирование динамики рабочей среды в контейнере. Результатом моделирования стала возможность определять на любом интервале времени значения нормальных и касательных напряжений, возникающих при воздействии рабочей среды на стенки обрабатываемой детали, полей скоростей, траекторий движения отдельно выбранной абразивной гранулы и т.д. Контур проектируемой детали соответствовал образцу, применяемому при обработке. Закон движения контейнера с деталью отвечал режимам работы реального технологического оборудования: амплитуда вертикальных колебаний 4 мм, частота 27,85 Гц. Установлен характер движения абразивных гранул во внутренних полостях различной формы.

Применение компьютерного моделирования при технологическом проектировании позволяет решить вопрос о целесообразности использования методов обработки свободными абразивами для конкретной конфигурации фасонной детали. Результаты моделирования позволяют установить диапазон значений коэффициентов, учитывающих расположение фасонных поверхностей для конкретных деталей.

Результаты экспериментов подтвердили адекватность теоретических моделей съема металла с поверхности обрабатываемых деталей и формирования профиля шероховатости поверхности с учетом комплексного влияния формы обрабатываемой поверхности и ее расположения на детали.

По результатам исследований разработаны технологические рекомендации по выбору рациональных режимов обработки с использованием прямого компьютерного моделирования процесса. Созданы банки данных коэффициентов формы и расположения при обработке фасонных поверхностей детали. Разработана методика проектирования технологических процессов обработки фасонных деталей.

Разработку технологического процесса обработки деталей сложной формы можно представить в следующем виде.

1. Выбор зернистости абразивных гранул осуществляют в зависимости от решаемой технологической задачи и от материала детали.

2. Выбор размера абразивных гранул. Для обработки конических и плоских участков рекомендуемый диаметр гранул не более 25-30 мм, что позволяет увеличить интенсивность обработки. Для обработки глухих карманов, отверстий, пазов и углублений рекомендуется уменьшать размер гранул в соответствии с размерами обрабатываемых поверхностей.

3. Расчет среднего арифметического отклонения шероховатости поверхности и съема металла в местах, где условия обработки наихудшие, производится по разработанным теоретическим зависимостям. При расчетах варьируют зернистость абразивных гранул, в зависимости от формы обрабатываемой детали – коэффициент формы и коэффициент расположения. По результатам расчетов корректируют выбранные режимы обработки. Параллельно рассчитывают съем металла и скругление острых кромок с поверхностей, интенсивность обработки которых максимальна. При этом наибольшая величина режимов обработки ограничивается допустимым изменением размеров и формы этих поверхностей. Затем вновь рассчитываются параметры качества обработанной поверхности и так до тех пор, пока все заданные характеристики не будут располагаться в требуемых пределах.

4. Из нескольких возможных вариантов технологического процесса выбирают тот, который обеспечивает наименьшее время обработки.

Разработанные на основании результатов исследований технологические рекомендации по проектированию технологического процесса обработки внедрены в ОАО НПП КП «Квант» (Ростов-на-Дону).

Выводы. 1. Разработаны уточненные теоретические модели съема металла и формирования качества поверхностного слоя при обработке фасонных поверхностей свободными абразивами, позволяющие учесть влияние расположения обрабатываемой поверхности и ее форму.

2. Получены теоретико-вероятностные модели процесса единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали, позволяющие учесть влияние формы обрабатываемой поверхности на вероятность покрытия каждой точки поверхности пятном контакта.

3. В результате проведения комплексных экспериментальных исследований подтверждена адекватность предложенных моделей съема металла при обработке свободным абразивом. Разность между экспериментальными и теоретическими данными не превышает 20%.

4. Установлены закономерности формирования полей скоростей и напряжений гранулированных абразивных сред при прямом компьютерном моделировании обработки наружных и внутренних фасонных поверхностей с учетом размеров деталей, частиц среды и технологических параметров обработки, что позволило судить о целесообразности обработки и прогнозировать ее интенсивность.

5. С использованием прямого компьютерного моделирования процесса обработки выработаны рекомендации по выбору рациональных режимов обработки при решении различных технологических задач.

6. Создан банк коэффициентов, позволяющих учесть влияние формы и размеров элементов фасонных поверхностей на производительность и качество обработки при технологическом проектировании.

7. Разработана методика проектирования технологических процессов обработки фасонных деталей, позволяющая обеспечить минимальное время обработки за счет рационального выбора характеристик рабочей среды и режимов обработки.

Библиографический список

1. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук. – Ростов н/Д, 1995.

2. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение / Ю.Р. Копылов. – Воронеж: ВИМВД, 1999.

3. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных машинах / С.Н. Шевцов. – Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 2001.

Материал поступил в редакцию 22.03.2011.

References

1. Tamarkin M.A. Teoreticheskie osnovy` optimizacii processov obrabotki detalej svobodny`mi abrazivami: dis. ... d-ra texn. nauk. – Rostov n/D, 1995. – In Russian.

2. Kopy`lov Yu.R. Vibroudarnoe uprochnenie / Yu.R. Kopy`lov. – Voronezh: VIMVD, 1999. – In Russian.

3. Shevczov S.N. Komp`yuternoe modelirovanie dinamiki granulirovanny`x sred v vibracionny`x mashinax / S.N. Shevczov. – Rostov n/D: SKNCZ VSH, 2001. – In Russian.

MODELING OF LOOSE-ABRASIVE MACHINING TECHNIQUE FOR PROFILED SURFACES

O.A. ROZHNENKO, E.E. TISHCHENKO, E.M. TAMARKINA, Y.V. KOROLKOV
(Don State Technical University)

Probability-theoretical models of the unit contacting process of abrasive granules and the workpiece surface, of the removal of metal and forming the quality of the surface coating while processing profiled surfaces by loose abrasives are calculated. Regularities of forming velocity and stress fields of the granulated abrasive media under the direct computerized modeling are specified. A design technique for processing profiled parts is worked out. The technique permits to provide minimum time of processing due to the rational choice of operating environment characteristics and operating modes.
Keywords: *treatment processes modeling, loose abrasive, removal of metal from workpiece surface, quality of surface coating, design technique of processing, vibration treatment, centrifugal rotary treatment.*

УДК 550.834(075)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ ИМПУЛЬСНОГО НАЗЕМНОГО ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

В.П. ПЕВЧЕВ
(Тольяттинский государственный университет)

Предложена математическая модель нагрузки импульсного наземного источника сейсмических волн, позволяющая выбирать параметры основных элементов его конструктивной схемы при воздействии на грунт с превышением предела его упругости.
Ключевые слова: *сейсмоисточник, эффективность, продольные сейсмические волны, график колебаний.*

Введение. Сейсморазведка является одним из основных методов поиска полезных ископаемых. Эффективность сейсморазведочных работ определяется в значительной мере характеристиками источников сейсмических сигналов. Очевидным способом генерации сейсмических волн с поверхности грунта является деформация ее источником мощных механических воздействий (импульсных или вибрационных).

В конструкциях наземных импульсных сейсмоисточников, как правило, есть помещенная на поверхность грунта плита – излучатель, – над которой расположен массивный груз. Податливость излучателя и груза значительно меньше податливости грунта. Для импульсного воздействия через плиту на грунт груз сбрасывают на нее с заданной высоты (первый способ) или в сейсмоисточнике срабатывает специальный мощный импульсный привод (в настоящее время используется в основном электромеханический), отталкивающий груз от плиты (второй способ) [1].

Большое значение при проектировании автономного импульсного сейсмоисточника с ограниченным запасом энергоносителя имеет эффективность преобразования энергии привода или падающего груза в энергию сейсмических волн. Известно, что лишь часть механической энергии, переданной излучателю, преобразуется в целевые сейсмические волны – объемные продольные или поперечные. Часть ее преобразуется в поверхностные волны, являющиеся при сейсморазведке помехами. Распределение энергии генерируемых волн у современных сейсмоисточников с перпендикулярным поверхности воздействием на грунт такое: продольные – 7-9%, поперечные – 18-25%, поверхностные – 68-75% [2, 3]. Столь нерациональное использование механической энергии в немалой степени обусловлено отсутствием возможности оптимизировать параметры воздействия сейсмоисточника на грунт на этапе проектирования, а подбор размеров излучателя изготовленного серийного сейсмоисточника экономически нецелесообразен. В сложившейся ситуации ведущие сейсморазведочные работы организации вынуждены использовать сейсмоисточники, имеющие запас по мощности и генерирующие волны в широком диапазоне частот.

Расчетные модели взаимодействия вибрационного источника с полупространством грунта, позволяющие оптимизировать параметры воздействия на грунт, описаны [4, 5], а для импульсных сейсмоисточников адекватных указанных моделей нет, что является проблемой. Моделирование и исследование процесса взаимодействия наземного импульсного сейсмоисточника с нагрузкой – грунтом – актуальны и имеют прикладную и научную значимость при постановке новых задач сейсморазведки и при проектировании сейсмоисточников.

Цель исследования – разработка простой и адекватной математической модели нагрузки импульсного наземного сейсмоисточника в соответствии с поставленными задачами сейсморазведки, пригодной для оценки соответствия параметров формируемого механического импульса (величины, формы и длительности) размерам излучателя.

Методики моделирования процесса генерирования сейсмических волн механическим воздействием. Общее решение задачи о распространении в однородном упругом полупространстве произвольного воздействия, приложенного к свободной поверхности через излучатель ограниченной площади, известно как задача Лэмба. Согласно этому решению, при импульсном воздействии на полупространство в нем возникают и распространяются волны четырех типов: объемные продольные и поперечные, поверхностные и обменные, обусловленные взаимными преобразованиями волн разного типа на границах областей их существования [4]. Эти волны распространяются от излучателя по различным секторам и с различными скоростями: самая большая скорость у продольных волн, самая маленькая – у поверхностных.

Объемная продольная волна в грунте, генерируемая расположенным на нем излучателем, распространяется в секторе, ось которого совпадает с перпендикуляром к поверхности в центре излучателя. В пределах этого сектора для математического описания процесса генерации сейсмической волны можно использовать модель «сферического источника» [4] (реализуемого взрывом в скважине либо пульсирующим в воде газовым пузырем). Эта модель дает математическую трактовку нескольких простых физических принципов, что позволяет на их основе формулировать практические рекомендации. Для объемной продольной волны характерно следующее:

– имеет на любом расстоянии от источника определяющийся характером поля смещений на границе источника так называемый «график колебаний». Характер поля смещений источника представляет собой сравнительно быстро затухающие (в течение трех-четырех периодов) колебания;

– в пределах зоны не более одной длины волны от излучателя, кроме смещений грунта колебательного характера, обусловленных прохождением волн сжатия и разрежения, присутствуют также смещения вынужденного характера – апериодические. «График колебаний» в этой зоне содержит составляющие, пропорциональные и характеру поля смещений (с коэффициентом $1/r^2$, где r – расстояние от излучателя) и первой производной от него (с коэффициентом $1/r$) [4]. На значительном удалении от источника (более одной длины волны) из-за затухания вынужденной составляющей «график колебаний» приобретает практически неизменную форму, определяющуюся в основном первой производной от характера поля смещений (скоростью смещения). Регистрация сигналов в сейсморазведке осуществляется датчиками скорости;

– так как сила воздействия импульсного сейсмоисточника на грунт изменяется во времени, то в «графике колебаний» на значительном удалении от излучателя можно выделить две составляющие. Одна определяется размерами излучателя и волновыми свойствами грунта, а вторая – скоростью движения излучателя.

Однако в модели «сферического источника», как и во многих других математических моделях и решениях задач теории упругих колебаний, используется однородная среда. С использованием этой модели сложно установить соответствие характеристик излучаемого импульсным

сейсмоисточником сигнала параметрам механического импульса, а также размерам излучателя, так как не учитывается множество следующих важных факторов, например:

– невысокие (менее $5 \cdot 10^5$ Па) значения предела упругости в поверхностном слое грунта – в так называемой зоне малых скоростей (ЗМС) – и уменьшение модулей упругости (Юнга, Ламе) при уменьшении скорости воздействия;

– многокомпонентная неоднородная структура грунта (газ, жидкость, твердые фракции различных форм и размеров);

– свойство грунта уплотняться в ходе каждого сжатия и разрыхляться при снятии с него давления, т.е. изменчивость его структуры – «скелета» – и т. д.

Таким образом, использование структурных распределенных математических моделей нагрузки импульсного сейсмоисточника, в которых объектами исследования являются поля физических величин, ограничено. Число совместно исследуемых различных сред (число деталей, материалов, фаз агрегатного состояния) в практически используемых моделях такого уровня не может быть большим ввиду сложностей вычислительного характера. Кроме того, для исследования только лишь динамических характеристик сейсмоисточника такая модель избыточна. Для этой цели может оказаться достаточной модель грунта с сосредоточенными параметрами. Для ее построения необходимо провести ранжирование свойств грунта как нагрузки сейсмоисточника и включать в ее модель наиболее значимые свойства.

Свойства поверхностного слоя грунта. Основным ограничивающим фактором процесса генерации сейсмических волн в грунте, который обязательно должен быть учтен в модели, является предел упругой деформации σ_y грунта. Зависящие от величины σ_y предельные значения параметров воздействия сейсмоисточника на грунт определяются по известным формулам:

– максимальная скорость смещения частиц грунта в продольной волне упругих деформаций, задающая предел скорости $v_{\max}$ движения излучателя [6]:

$$v_{\max} = \sigma_y \Big/ \left(\rho v_{\text{p}}\right), \quad (1)$$

где ρv_{p} – волновое сопротивление грунта, Па·с/м; ρ – плотность грунта, кг/м^3; v_{p} – скорость распространения продольных сейсмических волн в грунтовом полупространстве, м/с:

$$v_{\text{p}} = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} .$$

Здесь E – модуль Юнга, Па; μ – коэффициент Пуассона. При скорости движения излучателя большей $v_{\max}$ грунт под ним подвергается пластическим деформациям;

– максимальное время действия деформаций сжатия определяется временем, после которого избыточное давление в волне напряжений в грунте, контактирующем с движущимся вниз излучателем, исчезает [7]:

$$t_{\max} = D \big/ v_{\text{p}} , \quad (2)$$

где D – диаметр излучателя (для излучающей поверхности круглой формы), м:

$$D = 2\sqrt{S_A/\pi} ,$$

S_A – площадь излучающей поверхности, м^2:

$$S_A \geq F_{\max} \big/ \sigma_y . \quad (3)$$

Здесь $F_{\max}$ – максимальное значение развиваемого сейсмоисточником усилия F воздействия на грунт. При превышении $F_{\max}$ также возникают пластические деформации грунта;

– минимальное время действия деформаций [6]:

$$t_{min} = x_{max} / v_{max} = x_{max} \rho v_p / \sigma_y \ , \qquad (4)$$

где x_{max} – максимальное значение упругих деформаций грунта под излучателем, м. Если пренебречь неравномерностью нагрузки по площади излучающей поверхности, то получим:

$$x_{max} \approx D\sigma_y / E \ ,$$

$$t_{min} = \rho v_p D / E \ .$$

Известно, что предел упругой деформации для неуплотненных поверхностных слоев грунта весьма мал: σ_y =(2–5)·10^5 Па, и при характерных для них значениях плотности ρ =1500-1800 кг/м^3, модуля E =10^8-10^9 Па и скорости v_p =100-500 м/с, максимально допустимая скорость вертикальных деформаций v_{max} =1-2 м/с [6]. При этом при диаметре излучателя сейсмоисточника один метр время действия деформаций лежит в диапазоне от t_{min} =(1–5)·10^{-3} с до t_{max} =(4–20)·10^{-3} с (середина диапазона (4–7)·10^{-3} с), сила воздействия на грунт ограничена значением (2–5)·10^5 Н, а максимальное значение упругих деформаций грунта x_{max} =(2–4)·10^{-3} м.

Следовательно, лишь при малой скорости движения излучателя и малом давлении на поверхность грунта механическая энергия сейсмоисточника независимо от его размеров и мощности может использоваться эффективно, так как интенсивность генерируемых волн прямо пропорциональна величине упругих деформаций, вызвавших колебания. При более высокой скорости воздействия на грунт в зоне контакта излучателя с ним происходят пластические деформации грунта (сжатие под излучателем и сдвиг по его периметру) до глубины, на которой скорость смещения частиц грунта уменьшается до величины v_{max} . «Избыточная» механическая энергия сейсмоисточника не участвует в создании целевых сейсмических волн, а лишь увеличивает интенсивность поверхностных волн – помех – приводит к увеличению запаса «реактивной» механической энергии в конструкции сейсмоисточника.

Максимальная длительность воздействия сейсмоисточника ограничена также тем, что его излучатель для обеспечения необходимой жесткости при заданных площади контакта с грунтом и площади, на которую воздействует импульс силы механического привода, может иметь значительную массу. Колебательная система – массивный излучатель на упругом грунте («очаг излучения» [4, 5]) – имеет частоту собственных колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{1/(m_1 + m_g)e_g} \ , \qquad (5)$$

где m_1 – масса излучателя, кг; m_g – «присоединенная масса» грунта [8], кг; e_g – податливость грунта под излучателем, м/Н.

Если привод сейсмоисточника создает силу воздействия на излучатель, направленную вниз, в течение времени, большего половины периода собственных колебаний этой колебательной системы, то часть его механической энергии расходуется не на создание сейсмической волны, а на торможение движущегося вверх излучателя, т.е. неэффективно. Величина t_{max} , соответствующая по формуле (5) длительности одного полупериода: $t_{max} = \pi/\omega_0$, определяется также по формуле (2). Если t_{max} , определенная по формуле (2), меньше π/ω_0 , то излучатель необходимо облегчать.

Очаг излучения играет также роль фильтра, подавляющего колебания, частота которых отличается от частоты ω_0 [4]. Поэтому изменение размеров и формы излучателя в не меньшей мере обусловлено техническими требованиями к частотным характеристикам излучаемого сейсмоисточником сигнала.

Известные модели грунта. Для нужд строительства в науке о грунтах используются модели с сосредоточенными параметрами, разработанные для определения его несущей способности, в том числе и при воздействии на него импульсных или вибрационных нагрузок. Но известные методики определения параметров этих моделей в статике для решения поставленной в исследовании задачи неприменимы. Можно воспользоваться лишь элементами структуры этих моделей. Все такие модели грунта представляют его как систему, обладающую упругими и диссипативными свойствами [9]. Некоторые модели просты: модели Кельвина – Фойгта и Максвелла (рис.1, *а*, *б*), некоторые сложнее. Например, модель Шведова (рис.1, *в*), которая содержит кроме элемента e_g, моделирующего упругие свойства грунта, и элемента s_v, моделирующего вязкое трение в грунте, элемент s_p, моделирующий пластические изменения грунта.

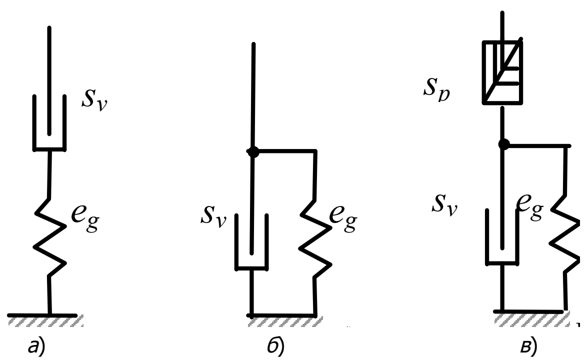


Рис.1. Статические модели грунта

Для моделирования процесса взаимодействия излучателя вибрационного сейсмоисточника с грунтом используется $m_g e_g s_g$ модель нагрузки (рис.2) [5], где m_g – масса прилегающего к излучателю грунта, колеблющегося в фазе с излучателем, кг; e_g – податливость грунта, м/Н; s_g – «сопротивление излучения», Н·с/м:

$$m_g = k_m \rho R^3 \approx 1{,}3\rho R^3 , \quad (6)$$

$$e_g = \frac{k_e}{\rho R\, v_p^2} \approx \frac{12}{\rho R\, v_p^2} , \quad (7)$$

$$s_g = k_s \rho R^2 v_p \approx 5\rho R^2 v_p , \quad (8)$$

где *R* – радиус излучателя, м; k_m, k_e, k_s – эмпирические коэффициенты.

Ее $L_g C_g R_g$ аналог в системе электромеханических аналогий «сила $F \leftrightarrow$ напряжение U», представлен в докладе академии наук [10].

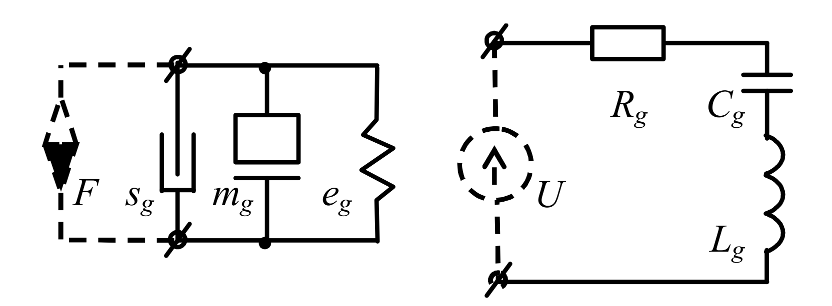


Рис.2. Линейная модель грунта под сейсмоисточником
и ее электрический аналог

Линейная $m_g e_g s_g$ модель упругого полупространства применима в исследованиях сейсмоисточников лишь при соблюдении ограничений (1)-(4). Для более широкого диапазона изменения параметров воздействий на грунт определение параметров модели грунта (6)-(8) вызывает трудности. Продольная волна деформаций, инициированная вертикальным движением излучателя импульсного сейсмоисточника, при скорости смещения частиц грунта больше $v_{\max}$ [см. формулу (1)] является в значительной мере волной пластических деформаций. Из-за них возрастает масса прилегающего к излучателю грунта m_2 и может снижаться частота ω_0 [см. формулу (5)]. Лишь после уменьшения скорости смещения частиц грунта на некотором расстоянии от излучателя до значения $v_{\max}$ продольная волна становится волной в основном упругих деформаций.

Предлагаемая модель грунта. Для учета отмеченных свойств колебательной системы «излучатель сейсмоисточника – грунт» ее расчетную электрическую схему замещения можно составить из следующих блоков (рис.3).

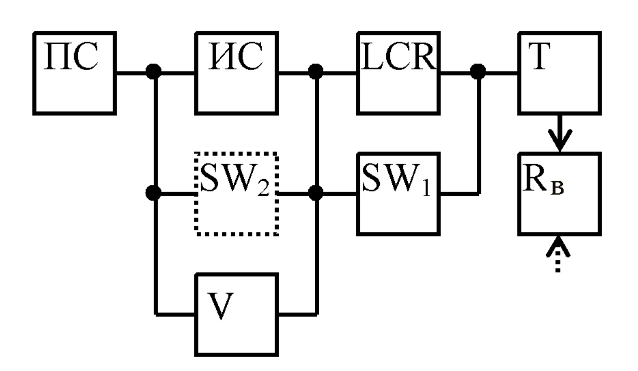


Рис.3. Структура предлагаемой модели грунта

Блок LCR выполняет функцию упругой опоры для излучателя сейсмоисточника – ИС. Это модель типа $m_g e_g s_g$ (см. рис.2), формирующая «график колебаний». Присоединенную массу m_g грунта зададим как нелинейный параметр. Пусть ее величина изменяется от нуля до рассчитанного по формуле (5) значения за время прохождения волной расстояния, равного диагонали излучателя [8]:

$$\text{при } t < \frac{2R}{v_{\text{p}}}: \quad m_{\text{g}} = 0{,}65 \rho v_{\text{p}} R^2 t \,.$$

Блок SW_1 моделирует с помощью управляемых электрических ключей контакт излучателя с грунтом. Излучатель при движении вверх отрывается от грунта в момент, когда сила их взаимодействия становится нулевой, и вновь соприкасается с ним, вернувшись в исходное относительно него положение. Для сейсмоисточника, привод ПС которого реализует ударный способ воздействия, добавляется показанный пунктиром блок SW_2, моделирующий контакт и процесс частично-упругого соударения падающего груза с излучателем.

Блок V моделирует снижение напряжений в сжимаемом грунте до уровня, задаваемого пределом упругости грунта σ_y. Если скорость $v_и$ движения излучателя превышает рассчитанную по формуле (1) величину, то избыточная скорость «гасится» с помощью функционального источника J (тока $\leftrightarrow$ скорости [10]). Силу тока такого источника определим функцией вида:

$$J = if\left(v_и > v_{max},\ v_и - v_{max},\ 0\right).$$

Выходной блок представляет собой линию задержки T, нагруженную волновым сопротивлением $R_в$ грунта, равным $\rho v_р$. Сигнал на линию задержки подается с резистора R_g блока LCR, т.е. является пропорциональным скорости смещений частиц грунта. Регулированием затухания в линии задержки и ее длины (времени прохождения волны) можно настроить модель на известный по результатам полевых сейсморазведочных работ на эталонном профиле случай и в последующем использовать его в качестве базы для сравнения эффективности одиночных сейсмоисточников или их групповой работы. На практике фиксация сейсмоприемниками отражений сейсмических волн с очень большой глубины недоступна из-за наличия сейсмических шумов. Следовательно, по результатам моделирования можно будет считать более эффективным тот сейсмоисточник, сигнал с выходного блока которого будет превышать заданный уровень шума по прошествии большего времени.

Моделирование групповой работы сейсмоисточников в этой модели достигается возможностью подключения к общему блоку $R_в$ выходов линий задержки T от схем замещения нескольких сейсмоисточников.

Заключение. Предложенная модель может быть реализована как в программах численного расчета систем дифференциальных уравнений, так и с применением программных комплексов электрических схем, например, Micro-Cap, PSpice и т.д. [11]. В настоящее время продолжается сопоставление результатов, получаемых с ее использованием, с экспериментальными.

Библиографический список

1. Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка / В.В. Майоров, М.Б. Шнеерсон. – М.: Недра, 1988. – 237 с.
2. Miller G.F. Partition of energy between elastic waves / G.F. Miller, H. Pursey // Proceedings of the Royal Society. – 1955. – A233.
3. Опарин В.Н. Геомеханические и теоретические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / В.Н. Опарин [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2010. – 404 с.
4. Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка: учебник для вузов / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. – М.: Недра, 1980. – 551 с.
5. Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн / И.С. Чичинин. – М.: Наука, 1984. – 223 с.

6. Молоканов Г.И. Преобразование механической энергии в сейсмическую при ударе по поверхности / Г.И. Молоканов // Разведочная геофизика. – М., 1979. – Вып.65. – С.3-12.

7. Харкевич А.А. Избранные труды. В 3 т. Т.1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы / А.А. Харкевич. – М.: Наука, 1973. – 399 с.

8. Григолюк Э.И. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью / Э.И. Григолюк, А.Г. Горшков. – Л.: Судостроение, 1976. – 200 с.

9. Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения / Л.С. Амарян. – М.: Недра, 1990. – 220 с.

10. Гамбурцев Г.А. О составлении электромеханических аналогий / Г.А. Гамбурцев // Докл. акад. наук СССР. – 1935. – № 8-9. – С.303.

11. Певчев В.П. Использование программы Micro-Cap при моделировании процесса срабатывания импульсных электромеханических устройств / В.П. Певчев // Электротехника. – 2010. – №4. – С.55-59.

Материал поступил в редакцию 21.03.2011.

References

1. Majorov V.V. Nazemnaya nevzry`vnaya sejsmorazvedka / V.V. Majorov, M.B. Shneerson. – M.: Nedra, 1988. – 237 s. – In Russian.

2. Miller G.F. Partition of energy between elastic waves / G.F. Miller, H. Pursey // Proceedings of the Royal Society. – 1955. – A233.

3. Oparin V.N. Geomexanicheskie i teoreticheskie osnovy` uvelicheniya nefteotdachi plastov v vibrovolnovy`x texnologiyax / V.N. Oparin [i dr.]. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 2010. – 404 s. – In Russian.

4. Boganik G.N. Sejsmicheskaya razvedka: uchebnik dlya vuzov / G.N. Boganik, I.I. Gurvich. – M.: Nedra, 1980. – 551 s. – In Russian.

5. Chichinin I.S. Vibracionnoe izluchenie sejsmicheskix voln / I.S. Chichinin. – M.: Nauka, 1984. – 223 s. – In Russian.

6. Molokanov G.I. Preobrazovanie mexanicheskoj e`nergii v sejsmicheskuyu pri udare po poverxnosti / G.I. Molokanov // Razvedochnaya geofizika. – M., 1979. – Vy`p.65. – S.3-12. – In Russian.

7. Xarkevich A.A. Izbranny`e trudy`. V 3 t. T.1. Teoriya e`lektroakusticheskix preobrazovatelej. Volnovy`e processy` / A.A. Xarkevich. – M.: Nauka, 1973. – 399 s. – In Russian.

8. Grigolyuk E`.I. Vzaimodejstvie uprugix konstrukcij s zhidkost`yu / E`.I. Grigolyuk, A.G. Gorshkov. – L.: Sudostroenie, 1976. – 200 s. – In Russian.

9. Amaryan L.S. Svojstva slaby`x gruntov i metody` ix izucheniya / L.S. Amaryan. – M.: Nedra, 1990. – 220 s. – In Russian.

10. Gamburcev G.A. O sostavlenii e`lektromexanicheskix analogij / G.A. Gamburcev // Dokl. akad. Nauk SSSR. – 1935. – # 8-9. – S.303. – In Russian.

11. Pevchev V.P. Ispol`zovanie programmy` Micro-Cap pri modelirovanii processa sraba-ty`vaniya impul`sny`x e`lektromexanicheskix ustrojstv / V.P. Pevchev // E`lektrotexnika. – 2010. – #4. – S.55-59. – In Russian.

MODELING OF THE LOAD OF GROUND IMPULSIVE ENERGY SOURCE

V.P. PEVCHEV
(Togliatti State University)

A mathematical model of the load of the ground impulsive energy source is presented. It permits to choose parameters of the basic elements of its construction diagram under the soil effect with surpassing the elastic limit.
Keywords: *seismic wave generator, efficiency, p waves, diagram of vibrations.*

УДК 004.032.24

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЗАДАНИЯМИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В КЛАСТЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ*

А.А. АЛЬ-ХУЛАЙДИ, Ю.О. ЧЕРНЫШЁВ
(Донской государственный технический университет)

Рассмотрена задача оптимизации распределения заданий по исполнителям в кластере. Разработаны алгоритмы, осуществляющие управление задачами. Проверка предложенных алгоритмов выполнена при решении транспортной задачи на кластере локальной сети. Получены данные, позволяющие судить об эффективности предложенных алгоритмов.
Ключевые слова: *кластеризация, планировщик задач, менеджер ресурсов.*

Введение. В последние годы активно ведутся работы, связанные с использованием технологии параллельной обработки, которая позволяет значительно повысить скорость выполнения работы. Поскольку суперкомпьютеры остаются достаточно дорогими, то только большие компании способны обладать такими вычислительными возможностями [1]. Решением проблемы является кластеризация законченных процессорных единиц воедино. Таким образом, существует возможность создать систему, вычислительная мощность которой будет сравнима с суперкомпьютером, а стоимость значительно меньше.

Постановка задачи. При параллельных вычислениях в кластерном пакете MPI/MPICH [2] есть одна проблема, а именно, отсутствие организации управления заданиями. Была поставлена задача разработать расширение для пакета MPICH, позволяющее управлять заданиями в кластере локальной сети. Для этого были разработаны и реализованы алгоритмы управления заданиями. Предложенные алгоритмы проверены на выбранном классе транспортных задач. Для этого разработан параллельный алгоритм нахождения опорного плана транспортной задачи на основе метода Фогеля (штраф) [3].

Модель транспортной задачи. Транспортная задача является специальным типом задач линейного программирования. Постановка этой задачи следующая. Имеется m поставщиков и n потребителей некоторой продукции. Заданы тарифы (стоимость) перевозок единицы продукции от поставщиков к потребителям, известны объемы запасов у поставщиков и потребности каждого потребителя в продукции [4].

Требуется составить план поставок продукции от поставщиков к потребителям так, чтобы суммарная стоимость перевозок была минимальной.

Математическая постановка этой задачи имеет вид:

$$\min \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}X_{ij};$$

$$\sum_{i=1}^{m} X_{ij} = b_j, \quad j = 1,2,\dots,n; \qquad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ij} = a_i, \quad i = 1,2,\dots,m;$$

$$x_{ij} \ge 0,\ i = 1,2,\dots,m,\ j = 1,2,\dots,n.$$

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-01-00481-а, г/б №1.21.11).

Здесь X_{ij} – объем; c_{ij} – тариф поставки продукции от i-го поставщика к j-му потребителю; b_j – потребности потребителей в продукции; a_i – запасы продукции у поставщиков.

Модель (1) является задачей линейного программирования со специальной матрицей. В этой задаче имеется $m \times n$ неизвестных X_{ij} и $(m+n)$ уравнений.

Решение транспортной задачи называется оптимальным планом перевозок (поставок) продукции.

Алгоритмы управления очередями заданий.

Алгоритм распределения ресурсов между процессами. Задание представляет собой абстрактную сущность, состоящую из набора команд и параметров. Оно представляется пользователю в виде скрипта, содержащего требования к ресурсам, атрибутов задания и набора команд, которые необходимо выполнить. Единожды создав скрипт задания, им можно пользоваться столько раз, сколько необходимо, также возможна его модификация. Задание сначала необходимо поставить в очередь планировщика, затем из этой очереди оно будет передано на один из узлов для выполнения.

Задание может быть обычным (regular) и интерактивным (interactive). Обычное задание ставится в очередь и затем ожидает своего выполнения, результат будет записан в указанное пользователем место. Интерактивное задание отличается тем, что потоки ввода и вывода перенаправляются соответственно на экран и клавиатуру. Команды задания вводятся непосредственно с клавиатуры.

В каждом задании для запуска запрашивается множество разных ресурсов, таких, как процессоры, память, время (обычное и процессорное). Может понадобиться дисковое пространство. С помощью менеджера ресурсов можно установить лимит каждого ресурса. Если лимит не устанавливается для какого-либо ресурса, то он считается равным бесконечности.

Алгоритм состоит из следующих процедур.

1. Определяются типы ресурсов, используемых данным заданием, их количество, а также приоритет задачи.

2. Задания распределяются по очередям (подгруппам) и упорядочиваются в порядке приоритета.

3. Службе управления очередью отсылается задание в исполняемый скрипт. Привязка к существующему резервированию осуществляется по ACL, т. е. резервирование ресурсов к этому моменту должно быть уже выполнено. Ресурсы могут быть следующих видов: количество процессоров, объем памяти, требуемое программное обеспечение, объем виртуальной памяти, количество времени и др.

Алгоритм управления запуском заданий для кластерных систем. Планировщик работает итерационно, т.е. перемежая процесс планирования с ожиданием или выполнением внешних команд [5]. Каждый цикл начинается при осуществлении одного из следующих событий:

– меняется состояние задания или ресурса;

– достигнута граница резервирования;

– получена внешняя команда;

– с начала предыдущего цикла прошло время, определенное как максимальное.

После того как сделано некоторое, конфигурируемое количество резервирований, начинает работу алгоритм обратного заполнения (backfill) [6]. Он выясняет, какие узлы и на какое время, начиная с текущего, свободны. После этого свободные узлы объединяются в окна. Суммарная «ширина» окон может оказаться больше количества свободных в данный момент узлов, так как некоторые узлы могут входить в несколько окон. Затем из всех окон выбирается одно, как правило, самое широкое. Среди всех оставшихся заданий выбирается наиболее точно удовлетво-

ряющее этому «окну» задание и запускается. Если есть возможность, то запускается не одно задание. Так как при запуске заданий алгоритмом backfill учитываются сделанные ранее резервирования, то соответствующие им задания не будут задержаны.

Рассмотрим теперь один цикл работы разработаного алгоритма. Он состоит из следующих шагов.

1. Получая сведения от системы пакетной обработки заданий (СПО) о машинах, стартовавших/закончившихся заданиях, конфигурации системы, планировщик обновляет свою внутреннюю информацию о состоянии ресурсов.

2. Корректируются сделанные резервирования исходя из обновленной информации о занятости узлов. Конкретнее – отменяются ранние резервирования, соответствующие уже завершившимся заданиям. На этой же фазе запускаются те ожидающие задания, время действия для которых уже наступило.

3. Далее, из всего количества заданий, стоящих в очереди СПО, отбираются те, которые готовы к запуску в настоящий момент. При этом принимаются во внимание такие аспекты, как состояние задания (задержано оно или нет), достаточно ли ресурсов всего кластера для запуска этого задания и т. п. После этого, из получившегося списка, отсеиваются задания в соответствии с политикой кластера.

4. Получившееся множество заданий упорядочивается в соответствии с приоритетами, которые назначаются исходя из ряда условий. В частности, принимаются во внимание запрашиваемые ресурсы, принадлежность задания тому или иному пользователю, историческая информация (кто, сколько заданий запустил, чтобы избежать ситуации, когда кластер «оккупирован» кем-то и недоступен для всех остальных).

5. В соответствии с полученным упорядоченным списком производится планирование. Задания рассматриваются, начиная с самого приоритетного. Последовательно получая задания из списка, планировщик запускает их до тех пор, пока это возможно.

Параллельный алгоритм нахождения опорного плана транспортной задачи на основе метода Фогеля (штраф). Пусть u – вектор потребностей потребителей, v – вектор мощностей поставщиков, z – матрица стоимости перевозок, x – матрица решения (поставок).

Основные шаги алгоритма следующие.

1. Для каждой строки и столбца матрицы стоимости перевозок считаем разницу между наименьшим значением стоимости и ближайшим к нему (так называемый *штраф*). Поиск штрафа по каждой строке и столбцу оформляется в виде отдельной задачи и назначается свободным процессам, т.е. распараллеливается.

2. Во всех строках и столбцах с наибольшим штрафом находим ячейки с наименьшим минимальным значением стоимости (не зачеркнутые ранее). Выполнение этого шага также распределяется между свободными процессами.

3. Максимизируем поставку в ячейку $x\,[i, j]$, выбрав минимальное значение из потребности потребителя $u\,[i]$ и мощности поставщика $v\,[j]$.

4. Если мощность поставщика полностью реализована или потребность потребителя полностью удовлетворена, вычеркиваем соответствующую строку или столбец.

5. Если не все потребности/мощности задействованы, повторяем алгоритм. Параллельная модификация алгоритма использует тот факт, что подсчет штрафов и поиск минимального элемента в пунктах 1, 2 соответственно поддаются параллелизации за счет разделения задач по поиску в разных строках и столбцах между несколькими потоками выполнения. Блок-схема параллельного алгоритма нахождения опорного плана решения транспортной задачи представлена на рис.1.

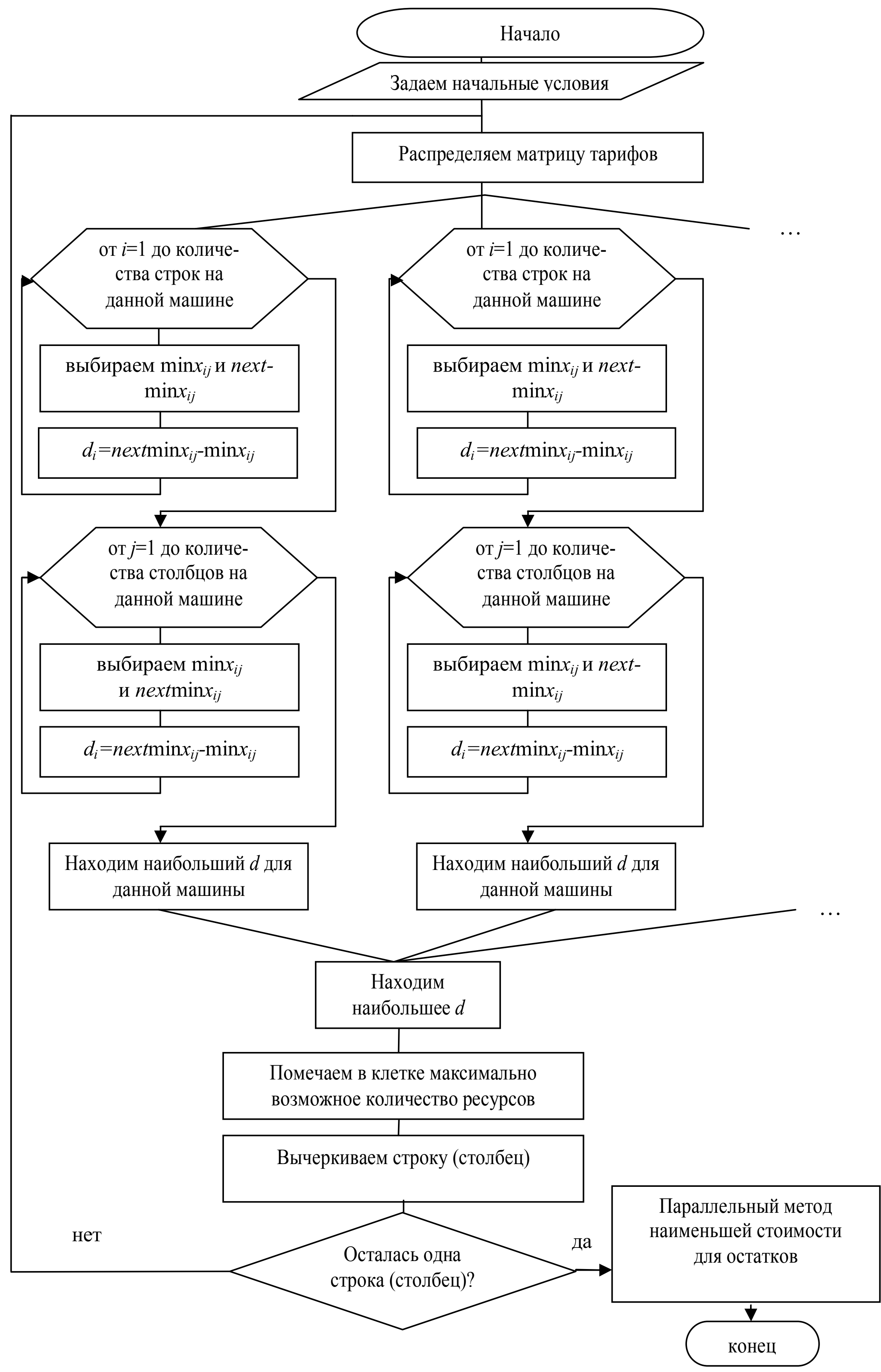


Рис.1. Блок-схема параллельного алгоритма нахождения опорного плана методом Фогеля

Экспериментальная проверка эффективности предложенных алгоритмов управления очередями заданий в кластерных системах. Практическая значимость работы заключается в том, что алгоритмы управления заданиями были применены для расширения библиотеки MPI/MPICH (по свободным лицензиям), т.е. в создании программной модели кластера, который содержит реализации предложенных алгоритмов. С использованием новой библиотеки MPI/MPICH_NEW была проверена эффективность параллельной программы нахождения опорного плана транспортной задачи на основе метода Фогеля (штраф) для кластера локальной сети.

Разработанный параллельный алгоритм проверялся путем реализации его на кластере следующей конфигурации:

– 4 вычислительных узла (Intel Pentium 4 2,4 ГГц);

– управляющий узел (Intel Pentium 4 2,4 ГГц).

Узлы объединены между собой сетью Infiniband (пропускная способность 4 Гбит/с).

Описанная программа реализована в среде C++. Обозначим время выполнения параллельного алгоритма на кластерном пакете MPI/MPICH – $T_{MPI/MPICH}$, а время выполнения параллельного алгоритма на улучшенном пакете MPI/MPICH_NEW – $T_{MPI/MPICH_NEW}$. Производительность (ускорение) определялась по формуле:

$$У = \frac{T_{MPI/MPICH}}{T_{MPI/MPICH_NEW}}.$$

Структурная схема пакета MPI/MPICH_NEW приведена на рис.2.

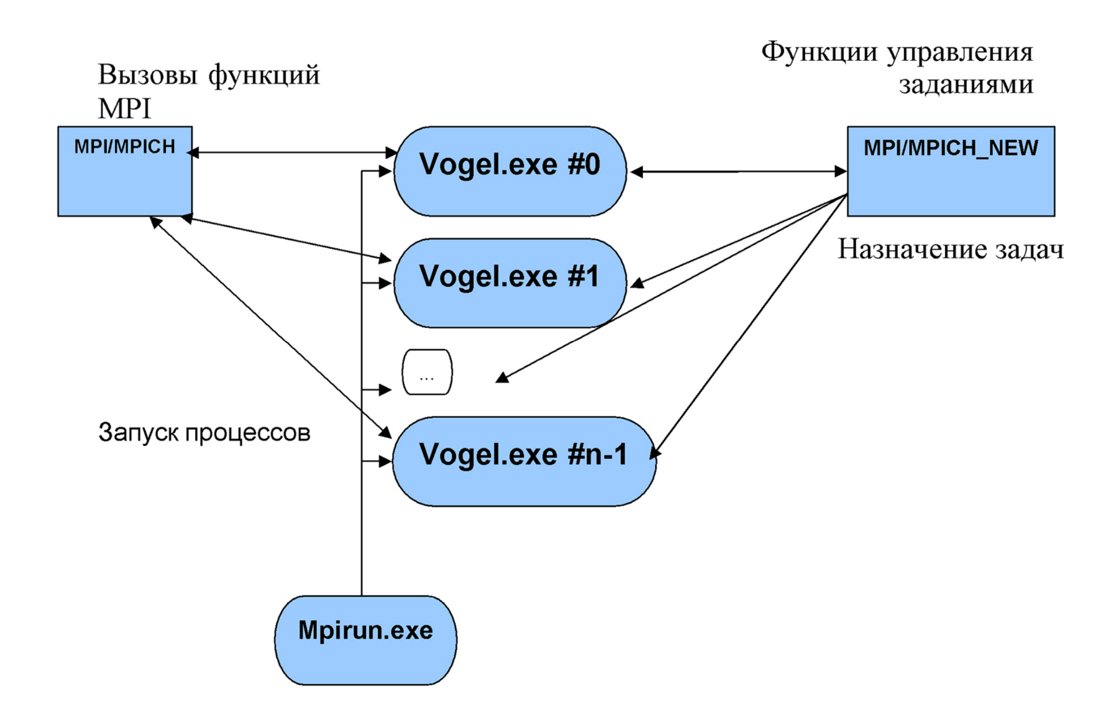


Рис.2. Структурная схема пакета MPI/MPICH_NEW

Библиотека MPI/MPICH_NEW содержит функции для управления заданиями задач и вычисляет назначение задач процессам. Она служит для запуска процессов на машинах кластера, для коммуникации между процессами, а также для вычислений в разделяемой памяти. Утилита

Mpirun.exe входит в реализацию MPI/MPICH и служит для запуска процессов,Vogel.exe – параллельные программы.

Испытание предложенных алгоритмов управления очередями заданий на транспортной задаче. Для оценки практической значимости разработанных алгоритмов проведено испытание и сравнительная характеристика библиотеки MPI/MPICH и нового улучшенного пакета MPI/MPICH_NEW, который содержит разработанные алгоритмы управления заданиями. Испытания проводили в три этапа. На первом этапе при размерности задачи 50×50, 70×70 и числе процессов 20 изменение производительности не происходило. На втором этапе при размерности задачи 100×100, 150×150, 500×500 и числе процессов 20 увеличение производительности стало более заметным (в 1,07 раз быстрее при расчете матрицы размера 500×500). На третьем этапе при увеличении числа процессов с 20 до 40 увеличение производительности стало более заметным (в 1,13 раз быстрее при расчете матрицы размера 1000×1000). Результаты вычислительных экспериментов, исследования предложенных алгоритмов управления заданиями, использованных в кластерном пакете MPI/MPICH_NEW, и сравнение их с пакетом MPI/MPICH приведены в таблице и на рис.3.

Сравнительная характеристика времени нахождения опорного плана параллельным алгоритмом на MPI/MPICH и MPI/MPICH_NEW в зависимости от размерности задачи и количества процессов

Размерность задачи	Количество процессов	Время выполнения параллельного алгоритма нахождения опорного плана, с		Прирост производительности $У$
		Стандартный MPI/MPICH	MPI/MPICH_NEW	
50×50	20	0,005	0,005	–
70×70	20	0,009	0,009	–
100×100	20	0,020	0,019	1,05
150×150	20	0,031	0,029	1,06
500×500	20	1,020	0,935	1,07
500×500	40	1,005	0,920	1,09
1000×1000	40	2,501	2,209	1,13

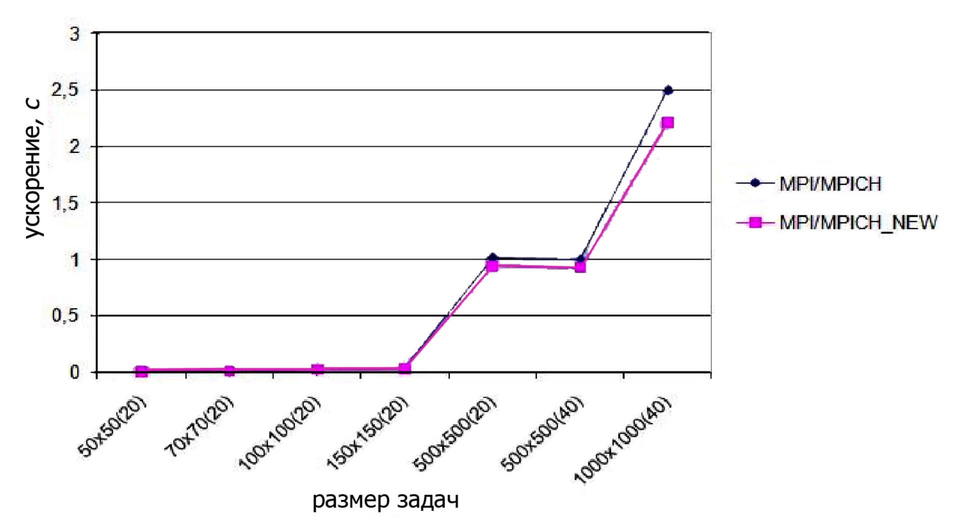


Рис.3. График времени выполнения программы в среде MPI до и после применения разработанных алгоритмов (в скобках указано количество процессов)

Из графиков виден незначительный прирост производительности при запуске программы в среде MPI/MPICH_NEW. Однако при увеличении числа процессов с 20 до 40 увеличение производительности становится более заметным (в 1,13 раз быстрее при расчете матрицы размера 1000×1000).

Выводы. Испытания алгоритмов управления заданиями в транспортной задаче на кластерной системе MPI/MPICH и новой модифицированной кластерной системе MPI/MPICH_NEW показали, что разработанные алгоритмы эффективно решают выбранный класс транспортных задач.

Библиографический список

1. Аль-хулайди А.А. Анализ существующих пакетов в кластерных сетях / А.А. Аль-хулайди, Н.Н. Садовой // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т.10, №3. – С.303-310.

2. Аль-хулайди А.А. Распределенные вычисления (кластерные вычисления) с использованием пакета параллельного программирования MPI / А.А. Аль-хулайди // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – №4. – С.28-29.

3. Аль-хулайди А.А. Разработка параллельного алгоритма построения опорного плана транспортной задачи / А.А. Аль-хулайди // Наука и образование (МГТУ им. Н. Э. Баумана) (электрон. журн.): электрон. науч.-техн. издание. – 2011. – №5. – С.1-14. – Режим доступа: technomag.edu.ru/pdf/out/182661.pdf.

4. Каныгин Г.И. Методы оптимизации / Г.И. Каныгин, Б.Ч. Месхи, Б.В. Соболь. – М.: Феникс, 2009. – 384 с.

5. Аль-хулайди А.А. Разработка алгоритма управления порядком запуска заданий для параллельной обработки / А.А. Аль-хулайди // Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства: Тр. IX междунар. науч.-техн. конф. «ИнЭРТ-2010», 6-8 окт. 2010 г. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С.426-433.

6. Коваленко В.Н. Труды международной конференции «Распределенные вычисления и Грид-технологии в науке и образовании» (Дубна, 29 июня – 2 июля 2004 г.) / В.Н. Коваленко, Д.А. Семячкин. – Дубна: ОИЯИ, 2004. – С.139-144.

Материал поступил в редакцию 17.05.2011.

References

1. Al`-xulajdi A.A. Analiz sushhestvuyushhix paketov v klasterny`x setyax / A.A. Al`-xulajdi, N.N. Sadovoj // Vestn. Donsk. gos. texn. un-ta. – 2010. – T.10, #3. – S.303-310. – In Russian.

2. Al`-xulajdi A.A. Raspredelyonny`e vy`chisleniya (klasterny`e vy`chisleniya) s ispol`zovaniem paketa parallel`nogo programmirovaniya MPI / A.A. Al`-xulajdi // Sovremenny`e naukoyomkie texnologii. – 2010. – #4. – S.28-29. – In Russian.

3. Al`-xulajdi A.A. Razrabotka parallel`nogo algoritma postroeniya opornogo plana transportnoj zadachi / A.A. Al`-xulajdi // Nauka i obrazovanie (MGTU im. N. E`. Baumana) (e`lektron. zhurn.): e`lektron. nauch.-texn. izdanie. – 2011. – #5. – S.1-14. – Rezhim dostupa: technomag.edu.ru/pdf/out/182661.pdf. – In Russian.

4. Kany`gin G.I. Metody` optimizacii / G.I. Kany`gin, B.Ch. Mesxi, B.V. Sobol`. – M.: Feniks, 2009. – 384 s. – In Russian.

5. Al`-xulajdi A.A. Razrabotka algoritma upravleniya poryadkom zapuska zadanij dlya parallel`noj obrabotki / A.A. Al`-xulajdi // Innovaciya, e`kologiya i resursosberegayushhie texnologii na

predpriyatiyax mashinostroeniya, aviastroeniya, transporta i sel`skogo xozyajstva: Tr. IX mezhdunar. nauch.-texn. konf. «InE`RT-2010», 6-8 okt. 2010 g. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – S.426-433. – In Russian.

6. Kovalenko V.N. Trudy` mezhdunarodnoj konferencii «Raspredelyonny`e vy`chisleniya i Grid-texnologii v nauke i obrazovanii» (Dubna, 29 iyunya – 2 iyulya 2004 g.) / V.N. Kovalenko, D.A. Semyachkin. – Dubna: OIYAI, 2004. – S.139-144. – In Russian.

ELABORATION OF TASK CONTROL ALGORITHMS WITH PARALLEL COMPUTING IN CLUSTER COMPUTING SYSTEMS

A.A. AL-KHULAIDI, Y.O. CHERNYSHEV
(Don State Technical University)

The optimum problem of the allocation of tasks for executing in the cluster is considered. Task control algorithms are elaborated. The algorithms validation is done in the performance of the transportation problem on the local network cluster. The data obtained permit to judge efficiency of the suggested algorithms.
Keywords: *clustering, task scheduler, resource manager.*

УДК 519.712

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ

А.Р. АЙДИНЯН, О.Л. ЦВЕТКОВА
(Донской государственный технический университет)

Исследованы задачи распределения неоднородных работ между неоднородными исполнителями с учетом затрат на выполнение работ и переключение между ними. Предложены генетические алгоритмы распределения работ, которые могут использоваться при решении различных практических задач как в автоматизированных процессах, так и в социальных системах.
Ключевые слова: *генетические алгоритмы, распределение работ, неоднородные работы, неоднородные исполнители.*

Введение. Задачи распределения работ между несколькими исполнителями возникают в различных областях науки, техники и социальных сферах, причем характер работ и правила их распределения могут быть различными в зависимости от рассматриваемой прикладной области.

Как правило, задачи распределения работ относятся к сложным многоэкстремальным задачам, эффективные методы решения которых известны только для ряда частных случаев. Обычно для получения точных решений применяют метод ветвей и границ, метод динамического программирования или эвристические методы [1, 2]. Эффективность метода ветвей и границ в существенной степени зависит от «точности» граничных оценок подмножеств решений. Известные эвристические методы и метод динамического программирования применимы только для определенного класса или даже вида задач и неэффективны или неприменимы при решении наиболее общей и наиболее приближенной к практике задачи – распределения работ в случае, когда затраты зависят от последовательности выполнения работ. Поэтому актуальной является разработка эффективных методов решения задач распределения неоднородных работ между несколькими неоднородными исполнителями.

Постановка задачи. При распределении работ между исполнителями необходимо минимизировать затраты на их выполнение. В понятие затраты включаются потери времени, расход электроэнергии, износ оборудования и т.д. В целях перехода к однокритериальной задаче оптимизации предлагается свести все учитываемые затраты к одному параметру. (Способ перехода от многокритериальной задачи к однокритериальной в данной статье не рассматривается).

Пусть имеется $n\ \left(i=\overline{1,n}\right)$ неоднородных исполнителей и $m\ \left(j=\overline{1,m}\right)$ неоднородных работ, представленных в виде множеств: $R=\{r_1,...,r_n\}$ и $W=\{w_1,...,w_m\}$ соответственно.

Особенностью рассматриваемой задачи является то, что процесс переключения исполнителя с работы на работу сопровождается затратами, которые зависят как от исполнителя, так и от последовательности работ.

Необходимо получить последовательность выполнения заданных работ так, чтобы при заданных свойствах исполнителей и работ минимизировать затраты на выполнение работ с учетом затрат на переключение.

Задания поступают на вход системы динамически, т.е. в любой момент времени t на вход системы может поступить задание. Таким образом, необходимо перераспределять работы в реальном масштабе времени, которые на момент времени t не выполнены или не выполняются. То есть работы находящиеся на выполнении не подлежат замещению.

Исполнитель характеризуется затратами на выполнение данного вида работы и затратами на переключение с одного вида работ на другой. Исполнитель может быть не способен выполнить какие-либо работы.

Затраты на выполнение исполнителями определенных работ представляются в виде матрицы Z размерности $n \times m$, в которой элемент z_{ij} показывает затраты на выполнение j-й работы i-м исполнителем. А затраты на переключение исполнителя с работы на работу – в виде матриц $P^{(i)}$ размерности $m \times m$ $\left(i=\overline{1,n}\right)$.

Таким образом, в результате решения задачи необходимо получить такое распределение работ между исполнителями, чтобы обеспечить выполнение следующего критерия:

$$F=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} z_{ij}c_{ij}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{f=1}^{m} p_{jf}^{(i)}u_{jf}^{(i)} \to \min, \qquad (1)$$

где c_{ij} – элемент матрицы C размерности $n \times m$, принимающий значение 1 или 0 и показывающий, выделена ли исполнителю i для выполнения работа j; $u_{jf}^{(i)}$ – элемент матрицы $U^{(i)}$ размерности $m \times n$, принимающий значение 1 или 0 и показывающий, планируется ли для i-го исполнителя переключение с работы j на работу f.

Первое слагаемое выражения (1) определяет затраты на выполнение всех планируемых работ, а второе – затраты на переключение исполнителей с работы на работу.

Задачу предлагается решать с использованием генетического алгоритма (ГА), который представляет собой простую модель эволюции в природе, реализованную в виде компьютерной программы [3]. В нем используются как аналог механизма генетического наследования, так и аналог естественного отбора. При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде.

Алгоритм решения задачи распределения работ зависит от количества исполнителей (один или несколько) и от того, учитываются ли затраты на переключение с работы на работу. В связи с этим предлагается провести декомпозицию задачи и получить алгоритм формирования последовательности выполнения работ для одного исполнителя и алгоритм распределения работ между исполнителями без учета затрат на переключение, а затем, путем объединения указанных алгоритмов, записать общий алгоритм.

Алгоритм формирования последовательности выполнения работ для одного исполнителя (Алгоритм 1). В случае одного исполнителя задача сводится к минимизации стоимости выполнения всех работ и аналогична задаче коммивояжера без необходимости возвращения в исходный пункт. При этом необходимо получить такую последовательность выполнения работ, чтобы выполнялся критерий:

$$F_1=\sum_{j=1}^{m}\sum_{f=1}^{m} p_{jf}u_{jf} \to \min.$$

Целевая функция (функция фитнеса) определяется как $\phi=-F_1$ и наилучшей является хромосома, имеющая наибольшее значение функции фитнеса.

Как известно, решение с помощью ГА сводится к последовательному выполнению следующих шагов:

– выбор символьной модели объекта в виде закодированных хромосом;

– генерация начальной популяции;

– модификация хромосом в целях улучшения популяции;

– выбор хромосомы из популяции с максимальным значением функции фитнеса.

Способ кодирования определяется спецификой задачи. При выборе символьной модели необходимо обеспечить возможность кодирования в хромосоме любой точки из пространства поиска. Невыполнение этого условия может привести к невозможности найти решение поставленной задачи.

Хромосома отражает последовательность выполнения работ исполнителем. Как указано выше, исполнитель должен выполнить m работ. Каждая хромосома G представляет собой конкатенацию ряда подкомпонентов, называемых генами $G=(g_1, g_2, \ldots g_m)$, где m – длина хромосомы. Число генов в хромосоме равно числу работ, поступивших на выполнение. Ген с номером i определяет номер работы, которую необходимо выполнить i-й в последовательности.

Поскольку одна работа должна быть выполнена только один раз, то каждая работа может входить в хромосому единожды.

Алгоритм получения начальной популяции заключается в следующем. Начальная популяция включает m хромосом. Первым геном i-й хромосомы является i-я работа. Каждым последующим j-м $\left(j=\overline{2,m}\right)$ геном является номер работы с минимальными затратами на переключение между текущей и последующей в соответствии с жадным алгоритмом.

Из полученных хромосом выбирается хромосома с максимальным значением функции фитнеса, т.е. хромосома, которая кодирует последовательность работ с минимальными затратами.

Затем осуществляется модификация выбранной хромосомы с помощью операции мутации.

В данном алгоритме не используется операция кроссовера, а только операция мутации над единственной выбранной хромосомой.

Можно предложить несколько операций мутации.

1. Перестановка двух произвольно выбранных генов. На рисунке приведен пример мутации путем перестановки генов 2 и 4.

1	2	3	4	5	6
1	**2**	3	**4**	5	6

а)

1	2	3	4	5	6
1	4	3	2	5	6

б)

Пример операции мутации, заключающейся в перестановке двух произвольных генов:
а – хромосома до мутации; *б* – хромосома после мутации

2. Циклический сдвиг на одну позицию генов, находящихся между двумя случайно выбранными.

3. Перестановка последовательности генов в другое место хромосомы.

4. Замена генов на обратную последовательность.

5. Перестановка последовательности генов в другое место хромосомы в обратной последовательности.

При модификации выбранной хромосомы предлагается повторять все пять мутаций с равной вероятностью до тех пор, пока не будет получено решение с удовлетворительными затратами или в течение некоторого количества мутаций не будет найдено решение с меньшими затратами.

Для увеличения вероятности правильного выбора переставляемых генов и уменьшения времени работы алгоритма введем понятие тесносвязанных работ (ТСР). Это такие работы i и j, для которых затраты на переключение с работы i на работу j меньше или равны затратам переключения с работы i на любую другую, кроме той, что предшествует работе i, или с любой другой на работу j. Соответственно, если эти условия не выполняются, то работы называются нетесносвязанными (НТСР).

Таким образом, разрыв хромосомы предлагается проводить таким образом, чтобы «не разрывались» тесносвязанные работы. Перестановка может осуществляться в любую позицию. После перестановки необходимо заново определить точки разрыва.

Если полученная после модификации последовательность работ, описанная хромосомой, имеет меньшие затраты, то она принимается вместо исходной, если нет – то отбрасывается.

В качестве примера проведем распределение работ, затраты на переключение между которыми представлены матрицей:

$$\begin{pmatrix} 0 & 10 & 20 & 30 & 40 & 50 & 150 & 140 \\ 10 & 0 & 10 & 20 & 30 & 40 & 150 & 50 \\ 20 & 10 & 0 & 10 & 20 & 30 & 90 & 30 \\ 30 & 20 & 10 & 0 & 10 & 20 & 80 & 90 \\ 40 & 30 & 20 & 10 & 0 & 10 & 90 & 120 \\ 50 & 40 & 30 & 20 & 10 & 0 & 100 & 80 \\ 150 & 150 & 60 & 50 & 90 & 100 & 0 & 10 \\ 100 & 90 & 80 & 100 & 110 & 120 & 10 & 0 \end{pmatrix}.$$

Необходимо выполнить каждую работу единожды. Поэтому затраты на выполнение каждой работы неважны.

Воспользовавшись алгоритмом получения начальной популяции, определим следующий набор хромосом:

12345687; 21345687; 32145687; 43215687;
54321687; 65432187; 78321456; 87432156.

В качестве начального приближения выберем первую хромосому 12345687, поскольку она кодирует последовательность работ с минимальными затратами на переключение, равными 140.

Обозначим НТСР знаком «–». В результате получим хромосому 123456-87 с двумя группами ТСР.

В результате выполнения операции мутации получена хромосома 123–87–456 путем применения модификатора 3. Затраты на переключение для этой хромосомы равны 130.

Предложенный метод решения имеет существенное преимущество перед ГА без введения понятия ТСР и полным перебором. Ясно, что количество операций будет зависеть как от количества генов (количества распределяемых работ), так и от количества ТСР.

Сравнительная характеристика полученного алгоритма с классическим ГА приведена в таблице.

Сравнительная характеристика алгоритмов

Количество генов	Количество НТСР	Время работы ГА, мс	Время работы ГА с ТСР, мс	Относительная погрешность полученного решения ГА с ТСР, %
8	3	63	12	0
8	6	63	25	0
24	6	270	31	0
24	12	270	56	0
24	16	270	89	1,1
32	6	634	34	0
32	12	634	64	1,4
32	18	634	93	2,4
100	18	3102	127	2,2
100	42	3102	1136	2,8

Из последнего столбца таблицы видно, что предложенный генетический алгоритм с ТСР может находить решение, отличное от точного с достаточно малой погрешностью.

Алгоритм распределения работ между исполнителями без учета затрат на переключение (Алгоритм 2). Для распределения работ между несколькими исполнителями также можно использовать ГА. В этом случае необходимо получить такое распределение работ, чтобы выполнялся критерий:

$$F_2 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} z_{ij}c_{ij} \to \min .$$

Целевая функция (функция фитнеса) определяется как $\phi = -F_2$ и наилучшей является хромосома, имеющая наибольшее значение функции фитнеса.

Предлагается следующий алгоритм генерации начальной популяции при количестве исполнителей равном n. Начальная популяция будет включать хромосомы в количестве, кратном количеству исполнителей. Кодировка хромосомы имеет вид: в i-м гене находится номер исполнителя, который выполняет i-ю работу. Гены j-й хромосомы содержат номер исполнителя $j \bmod m$, где mod – операция вычисления остатка от целочисленного деления j на m. В случае, если исполнитель j не может выполнить работу i, то в гене i во всех хромосомах популяции необходимо заменить число j на номер другого исполнителя. Таким образом, можно учесть предпочтение передачи работы какому-то исполнителю.

Поскольку один исполнитель может выполнить несколько работ, то номер одного и того же исполнителя может присутствовать в разных генах.

При этом важным является правильный выбор размера популяций. Размер популяции может повлиять как на скорость сходимости, так и на качество найденного решения. Правильный выбор размера популяций может быть осуществлен только экспериментальным путем. В проведенных экспериментах размер популяции для 8 исполнителей и 32 работ принимался в количестве 80.

Проиллюстрируем алгоритм получения начальной популяции на примере. Пусть имеется 3 исполнителя и 6 работ.

Примем размер начальной популяции равным шести хромосомам. В случае, если любой исполнитель может выполнить любую работу, то начальная популяция имеет вид:

111111; 222222; 333333; 111111; 222222; 333333.

Для случая, если исполнитель 3 не может выполнить работу 2, передадим работу 2 исполнителям 1 и 2 с равной вероятностью. В связи с этим в хромосомах 3 и 6 работа 2 передана исполнителям 1 и 2 соответственно, что обеспечивает равную вероятность выполнения работы 2 этими исполнителями. Таким образом, начальная популяция имеет вид:

111111; 222222; 313333; 111111; 222222; 323333.

Генерация начальной популяции является подготовительным этапом к процессу субоптимизации, который заключается в последовательном применении к полученной популяции генетических операторов согласно ГА.

В данном алгоритме используется модель ГА Уитли (D. Whitley). При скрещивании произвольно выбранных двух хромосом применяется одно- или двухточечный кроссинговер с равной вероятностью. Местоположение точек разрыва выбирается случайным образом. В результате скрещивания получается один потомок, к которому применяется операция мутации.

Мутация заключается в замене в каком-либо гене номера исполнителя на другой, выбранный случайно. Количество мутаций предлагается принимать не более 5% от количества работ. Так, при 32 работах были выполнены мутации в 1-2 генах.

При выполнении L скрещиваний полученная хромосома занимает в популяции во время первых $L/2$ скрещиваний место родительской хромосомы с минимальным значением функции фитнеса, а на последних $L/2$ скрещиваниях – место хромосомы с минимальным значением функции фитнеса во всей популяции.

Алгоритм заканчивает свою работу при достижении удовлетворительного решения или при выполнении указанного количества скрещиваний. При проведении вычислительных экспериментов при 32 работах, 8 исполнителях и размере популяции равном 32 количество скрещиваний принималось равным 750, что позволяло получать решение, близкое к оптимальному.

Алгоритм распределения работ между исполнителями с учетом затрат на переключение (Алгоритм 3). Этот ГА представляет собой комбинацию двух вышеприведенных алгоритмов и позволяет минимизировать критерий (1). Алгоритм имеет вид.

1. Генерация начальной популяции в соответствии с Алгоритмом 2.
2. Определение последовательности работ для каждой хромосомы популяции в соответствии с Алгоритмом 1 и вычисление значения функции фитнеса.
3. Сохранение максимального значения функции фитнеса $\phi_{\max}$.
4. Отбор двух родителей и получение потомка путем скрещивания и мутации в соответствии с Алгоритмом 2.
5. Вычисление значения функции фитнеса ϕ для полученного потомка.
6. Если количество полученных потомков менее $L/2$, то замена потомком родителя с минимальным значением функции фитнеса, иначе – замена потомком наименее приспособленной хромосомы в популяции.
7. Если $\phi > \phi_{\max}$, то перейти на шаг 8, иначе – перейти на шаг 4.
8. Генерация начальной популяции для каждого исполнителя в соответствии с Алгоритмом 1.
9. Получение последовательности работ в соответствии с Алгоритмом 1.
10. Вычисление значения функции фитнеса ψ с учетом последовательности работ.
11. Если $\psi > \phi_{\max}$, то принять $\phi_{\max} = \psi$.
12. Если достигнуто удовлетворительное решение или выполнено указанное количество скрещиваний, то перейти на шаг 13, иначе – перейти на шаг 4.
13. Конец алгоритма.

После получения хромосомы, описывающей распределение работ между исполнителями без учета затрат на переключения, для каждого исполнителя выполняется алгоритм формирования последовательности работ для одного исполнителя с учетом затрат на переключение. Как следует из алгоритма, в целях экономии времени алгоритм формирования последовательности работ для каждого исполнителя (шаги 8-12) выполняется в том случае, если полученная хромосома имеет значение функции фитнеса больше сохраненного максимального значения $\phi_{\max}$. Только в этом случае есть возможность получить распределение работ между исполнителями с затратами меньше ранее найденного решения.

Для уменьшения времени работы алгоритма также используется понятие ТСР. Однако это понятие в данном случае принимает следующий вид. Тесносвязанными являются работы i и j, для которых затраты на переключение с работы i на работу j меньше или равны затратам переключения с работы i на любую другую этого исполнителя, кроме той, что предшествует работе i, или с любой другой работы этого исполнителя на работу j.

Проведенные эксперименты показали, что относительная погрешность найденного решения по сравнению с оптимальным для восьми исполнителей и 32 работ при количестве скрещиваний равном 320 не превышает 7%. При этом время работы алгоритма составило около 9 с на современном ПК.

Заключение. Предложенные алгоритмы позволяют осуществить распределение работ между исполнителями и сформировать последовательность выполнения работ с учетом затрат на переключение. Проведенные вычислительные эксперименты подтверждают возможность использования полученных алгоритмов при решении различных практических задач, связанных с распределением работ, как в автоматизированных процессах, так и в социальных системах. Последующие

доработки связаны с проведением исследований и получением рекомендаций по выбору параметров генетического алгоритма, обеспечивающих уменьшение вычислительных затрат, сходимость алгоритма и нахождение приемлемого субоптимального решения.

Библиографический список

1. Емельянов В.В. Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.

2. Реклейтис Г. Оптимизация в технике (в 2 кн.) / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэксдел. – М.: Мир, 1988. – 348 с.

3. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

Материал поступил в редакцию 03.05.2011.

References

1. Emel`yanov V.V. Teoriya i praktika e`volyucionnogo modelirovaniya / V.V. Emel`yanov, V.V. Kurejchik, V.M. Kurejchik. – M.: Fizmatlit, 2003. – 432 s. – In Russian.

2. Reklejtis G. Optimizaciya v texnike (v 2 kn.) / G. Reklejtis, A. Rejvindran, K. Re`ksdel. – M.: Mir, 1988. – 348 s. – In Russian.

3. Rutkovskaya D. Nejronny`e seti, geneticheskie algoritmy` i nechyotkie sistemy` / D. Rutkovskaya, M. Pilinskij, L. Rutkovskij. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2006. – 452 s. – In Russian.

GENETIC ALGORITHMS OF WORK DISTRIBUTION

A.R. AIDINYAN, O.L. TSVETKOVA

(Don State Technical University)

The tasks of heterogeneous work distribution among heterogeneous executors taking into account operation and switching process costs are investigated. Genetic algorithms of work distribution that can be used for solving various practical tasks both in the automated processes and in social systems are offered.

Keywords: *genetic algorithms, work distribution, heterogeneous work, heterogeneous executors.*

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 339.138

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ПРОДУКЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «ДОНСКОЙ ТАБАК»)

А.А. АНЦУПОВА
(Ростовский государственный экономический университет «РИНХ»)

Рассмотрено практическое применение методов воздействия на поведение потребителей. Проанализирована реакция потребителей на используемые производителями инструменты продвижения. Исследована эффективность применения различных методов изучения поведения потребителей в табачной сфере. Сформирован список основных инструментов продвижения табачной продукции и доведения информации до конечного потребителя.
Ключевые слова: *поведение потребителей, маркетинговые исследования, фокус-групповое исследование, фокус-группа, методики групповых дискуссий.*

Введение. В настоящее время рынок товаров повседневного спроса, т.е. товаров FMCG (от англ. Fast Moving Consumer Goods – быстро оборачиваемый потребительский товар) является высоко динамичным. Следствием подобной динамики является усиление и ужесточение конкурентной борьбы за своего потребителя. Подобное стрессовое состояние рынка способствует совершенствованию и развитию методов продвижения продукции производителями и заставляет более внимательно изучать поведенческие реакции на различные методы со стороны потребителей. Для этого используют более традиционные методы, такие, как in-door реклама, промоушн-акции, реклама в средствах массовой информации, стимулирование сбыта, кроме того, используются методы, применение которых востребовано развивающимся рынком: совершенствование самого продукта, модернизация и наращивание производственных мощностей, диверсификация и дифференцирование производства, расширение ассортимента, вариативность дизайна и технологий упаковки товаров.

В основе конструктивного подхода к определению методов изучения поведения потребителей лежит понимание производителем потребностей своих клиентов, актуализация средств воздействия на сознание людей, в условиях информационной перегрузки. В процессе принятия решения о покупке, потребитель руководствуется множеством факторов, к которым относятся: восприятие товаров всеми группами, оказывающими влияние на принятие решение о покупке, отношение потребителя к конкретной группе товаров, социальные факторы, маркетинговые стимулы [1].

Согласно определению Л.А. Данченок, «поведение потребителей – это деятельность, направленная непосредственно на получение, потребление и распоряжение продуктами и услугами, включая процессы принятия решения, которые предшествуют этим действиям и следуют за ними» [2].

С позиций психологии выделяется ряд неравнозначных в конкретной ситуации функций, участвующих в процессе принятия решений: интуиция, мышление, переживание эмоций и восприятие. Но изобилие товаров и услуг и возможность мгновенного удовлетворения любой потребности, ограниченная только финансовыми возможностями потенциального потребителя, приводят к утрате, с одной стороны, интереса, а с другой – навыков принятия решений. В этой связи позиционирование, определяющее место, занимаемое товаром на рынке, и формирующее желаемый образ товара в сознании потребителей, становится основным маркетинговым стимулом.

«Стратегически и тактически выверенное позиционирование продукта закладывает основы эффективной коммуникации» [1].

Позиционирование, которое работает, должно влиять на все элементы коммуникационного плана: от выбора средств массовой информации до поддержки имиджевых программ. «При определении позиционирования товара (услуги) необходимо особое внимание уделить формулированию параметров, составляющих основные определяющие характеристики выбранной ниши позиционирования. Данные параметры являются определяющими, и их четкое формирование говорит об успешности и верности выбранной ниши» [3].

Актуальность проверки теоретически описанных методов исследования покупательского поведения обусловлена необходимостью поиска путей увеличения объема продаж продукции ОАО «Донской табак» на территории регионов России.

Цель исследования – обобщение теории и анализ практических результатов, полученных при использовании методов изучения поведения потребителей, основанных на данных компании ОАО «Донской табак». Анализ результатов поможет определить направления формирования коммуникационной стратегии, основной целью которой является продвижение продукции, выпускаемой ОАО «Донской табак».

В качестве основных были выделены следующие задачи: получение информации об особенностях потребительского поведения представителей целевой группы в отношении табачных изделий; определение отношения представителей целевой группы к использованию различных методов продвижения продукции (выделение основных закономерностей поведения потребителей). Объект исследования – поведение потребителей в момент выбора того или иного товара (услуги).

В качестве предмета рассматривались следующие аспекты потребительского поведения представителей целевой группы: особенности приобретения и потребления табачных изделий; закономерности восприятия основных торговых марок табачных изделий различными категориями потребителей; мотивы потребительских предпочтений при выборе табачных изделий различных производителей и торговых марок; особенности восприятия рекламы и упаковки табачных изделий.

Характеристика отраслевого рынка. ОАО «Донской табак» работает на развивающемся с положительной динамикой высококонкурентном и рискованном рынке производства и продажи табачной продукции. Прогнозируемый рост цен на продукцию, производимую компанией, обусловлен рядом объективных условий (таких, как рост цен на сырье и комплектующие, ужесточение требований госта к параметрам безопасности табачных изделий, изменение конъюнктуры внутреннего и внешнего рынков под действием антитабачной политики государства и социальных общественных объединений и пр.) и субъективных факторов (налоговый компонент, акцизы, частичный запрет на рекламу табачных изделий).

Анализ ассортиментной политики предприятия свидетельствует о смещении акцентов в сторону увеличения доли марок, позиционируемых в высокостоимостном ценовом сегменте.

Российский табачный рынок является одним из крупнейших табачных рынков. По своей емкости в натуральном выражении он занимает третье место в мире после Китая и США. По данным исследовательского агентства «Бизнес-Аналитика» объем табачного рынка РФ в 2009 г. составил 371 млрд сигарет, что на 9 млрд больше, чем в 2008 г. Емкость рынка в стоимостном выражении – 350 млн руб., что на 9 млн руб. больше, чем в 2008 г. [4].

Совокупная доля рынка компании «Донской табак» составила в 4-м квартале 2009 г. – 5,3%. Более детально структура табачного рынка РФ в натуральном и стоимостном выражении приведена в табл.1 (по материалам [4]).

Средняя цена пачки сигарет компании составила в 4-м квартале 2009 г. – 17,9 руб. при среднерыночной цене на уровне 22,8 руб., что характеризуется как конкурентоспособный, сбалансированный портфель [4].

Таблица 1

Структура табачного рынка РФ по состоянию
на 4-й квартал 2009 г.

Компания	В натуральном выражении, млн сигарет	Доля рынка, %	В стоимостном выражении, млн руб.	Доля рынка, %
Philip Morris	19 626,8	25,7	26 766,4	31
JTI	16 356,7	21,5	19 844,3	23
B.A.T.	14 970,0	19,6	19 393,4	22
Liggett-Ducat	11 867,0	15,6	9 849,7	11
Reemtsma	4 116,0	5,4	3 921,0	5
Donskoy Tabak	4 077,5	5,3	3 648,4	4
Balkan Star	2 173,1	2,8	1 231,7	1
Other Local	1 289,1	1,7	477,7	1
Other International	881,4	1,2	1 498,1	2
Nevo-Tabak	884,0	1,2	433,4	0
Bulgar Tabak	11,8	0,0	4,9	0
Итого:	76 253,4	100	87 068,9	100

В условиях сильной конкуренции и ужесточения требований к рекламе табачных изделий, начавших действовать с 2007 г., компания периодически выпускает новые марки продукции в различных ценовых сегментах. Основными конкурентами являются крупные транснациональные компании – Philip Morris, Japan Tobacco International, British American Tobacco, Imperial-Tobacco, активно захватывающие российский табачный рынок в 2000-х гг.

В условиях современного рынка производители табачной продукции привлекают внимание потребителей, применяя различные методы продвижения. В качестве нетрадиционных можно отметить изобретение новых форматов табачных изделий, новых конструкций сигарет и совершенствование упаковки. Все это вызывает интерес у потребителя и позволяет рынку развиваться, открывая тем самым новые ниши.

Для того чтобы верно определить способ воздействия на потребителя, необходимо понимать его потребности, желания, опираясь на целевую аудиторию.

Целевая группа, целевая аудитория – группы людей, объединенных или общими признаками или ради какой-либо цели, задачи. К общим признакам можно отнести любые характеристики, например, работающие замужние женщины от 25 до 35 лет, которые курят сигареты формата Super Slims. Главное свойство целевой аудитории, с точки зрения рекламы, – то, что именно эти люди с большей вероятностью купят продукт. Поэтому на эту группу лиц и направлены рекламное сообщение и мероприятия по продвижению [5].

В целях выявления признаков привлекательности продуктов (товаров) для потребителей, факторов, влияющих на процессы принятия решения о покупке, необходимо использовать один из инструментов маркетингового анализа – маркетинговые исследования.

Маркетинговые исследования. В большинстве своем маркетинговые исследования трактуются как систематическое и объективное выявление, сбор, анализ, распространение и использование информации для повышения эффективности идентификации и решения маркетинговых проблем (возможностей).

«Систематические маркетинговые исследования позволяют получать сведения о контролируемых и неконтролируемых факторах среды и интересах различных групп, что повышает эффективность принимаемых решений, делают развитие рынка предсказуемым и повышают конкурентоспособность компании на этом рынке» [2].

В специализированной литературе по проблематике маркетинговых исследований идентифицируются и подвергаются классификации количественные и качественные методы исследований.

Одним из наиболее распространенных при проведении маркетинговых исследований табачного рынка, помимо дегустаций и количественных холл-тестов, является качественный метод фокус-группового интервью.

Фокус-групповое исследование заключается в детальном интервьюировании представителей целевой аудитории, во время которого исследователи получают субъективные мнения о товаре, услуге и прочих объектах исследования. Изучаются причины сложившегося отношения к товару, услуге, анализируются предлагаемые респондентами направления улучшения исследуемого объекта, рассматриваются различные ситуации потребления табачных изделий и формулируются закономерности поведения потребителей в заданных жизненных ситуациях. При отборе участников фокус-группы существуют определенные правила и рекомендации по формированию списка приглашенных респондентов. Впервые этот метод использовали социологи Р. Мертон и П. Кендалл в 1944 г. [5].

Преимуществами качественных методов являются объем информации, который предоставляет этот метод, большие возможности интерпретации полученных результатов. Кроме того, диапазон задач, которые решаются с помощью фокус-групп, необычайно широк: от анализа имиджа политика до оценки рекламного ролика или дизайнерского проекта [6].

Фокус-групповое исследование – это детальное групповое интервью, которое проводится специально подготовленным модератором и может проходить в непроизвольном стиле.

В одном из исследований, проводимых с использованием фокус-группового интервью как основного метода сбора качественной информации, выяснили: главное, что должно закладываться в продвижение марок табачных изделий – это позиционирование. Ни сегментирование по различным признакам и параметрам, ни разработка и совершенствование форматов, а четко выстроенная идея о том, что конкретно продвигаемый продукт предлагает массовому рынку, какие выгоды несет для потребителя.

В ситуации высокой конкуренции, когда транснациональные табачные компании ведут работы по дифференциации выпускаемой продукции, кроме формирования детального позиционирования, не менее важно тщательно изучать сегменты, что объективно обусловливает применение метода фокус-групповой дискуссии.

Компания ОАО «Донской табак» в недавних исследованиях использовала различные методики проведения групповых дискуссий: методика «Перечисление» подразумевает конкретизацию факторов выбора и критериев оценки табачных изделий; проективная методика «Покупатели» позволяет анализировать портрет «типичного покупателя» продукции конкретной марки, акцентируя внимание на образе покупателя, различиях и особенностях стиля и образа жизни потребителей этих марок; методика сортировки карточек позволяет ранжировать предложенные варианты дизайнов, выявляя тем самым основные закономерности восприятия упаковки табачных изделий различных торговых марок; наибольший интерес представляет методика тестирования концепций Д.Д. Дэвиса, позволяющая охарактеризовать предложения по следующим признакам: убедительность торгового предложения, оригинальность предложения, отсутствие/наличие качеств (уникального торгового предложения; соответствие предложения индивидуальным потребностям представителей целевой группы, привлекательность и перспективность предложения [7].

При качественном исследовании использована направленная выборка. Критерием ее формирования выступают требования к дизайну фокус-групп. Дизайн фокус-групп – принципы формирования групп, которые отвечают определенным, четко заданным критериям: пол, возраст, образование, область деятельности и т.д., т.е. параметры, требуемые для более точного отбора респондентов для проведения исследования среди непосредственной или потенциальной целевой аудитории. Наиболее общий принцип формирования групп состоит в том, чтобы участники принадлежали одному социальному слою и чувствовали себя комфортно в беседе друг с другом.

Желательно также, чтобы тема обсуждения была знакома респондентам по повседневному общению [8].

Признаки формирования фокус-групп, используемые в рассматриваемом исследовании, в обобщенном виде представлены в табл.2.

Таблица 2

Требования к дизайну фокус-групп

Принцип формирования групп	Группа №1	Группа №2	Группа №3
Критерий формирования	Основная потребляемая марка из портфеля компании	Марка из портфеля компании потребляется наряду с другими марками	Потребители марок-конкурентов
Пол	Все участники дискуссий – женщины		
Возраст	Половина участников в возрасте от 22 до 30 лет, вторая половина – в возрасте от 31 до 36 лет		
Отношение к курению	Все участники – курящие (потребление не менее трех сигарет в день)		
Формат потребления сигарет	Сигареты формата Super Slims – потребление не реже одного раза в неделю		
Основная потребляемая марка	Марка (потребляется чаще всего)	Марка (потребляется время от времени), другая марка (потребляется чаще всего)	Другая марка потребляется чаще всего (из списка конкурирующих марок)

Демографические и поведенческие границы целевой группы сформулированы исходя из возраста предполагаемого ядра целевой аудитории, максимального количества потребляемых сигарет в день, строго оговорен формат потребляемых сигарет; в качестве основных конкурентов рассмотрены различные торговые марки табачных изделий формата Super Slims.

Фокус-групповое исследование проведено в трех городах – Волгограде, Нижнем Новгороде и Новосибирске. В каждом из этих городов работали по три группы. Проведение фокус-групповых интервью на удаленных друг от друга территориях является одним из эффективных способов увеличения степени результативности проводимого исследования, и позволяет учесть различные мнения, полученные из регионов, отличающихся по уровню и стилю жизни, что позволяет более детально взглянуть на вопросы, поднимаемые при обсуждении в каждом отдельном городе.

Полученную в ходе исследования информацию обрабатывают и анализируют, а затем формируют аналитический отчет с выводами и рекомендациями. Дальнейший анализ результатов, позволяет сформировать видение ситуации со стороны потребителя, разработать стратегию и комплекс продвижения.

Итоги проведенного исследования. В результате анализа полученной в ходе исследования первичной информации сформулированы следующие выводы:

– табачные изделия женщины приобретают самостоятельно, по мере необходимости, в количестве одной-двух пачек;

– процесс курения воспринимается не как физиологическая зависимость, а как элемент культуры, ритуал, атрибут самостоятельности и независимости;

– сопутствующими условиями для курения являются напряжение, общение, расслабление;

– среднее количество выкуриваемых в день сигарет для представителей всех групп потребителей составляет 6-10 штук; о предпочтениях целевой аудитории: наиболее значимыми факторами является вкус сигарет (точнее, субъективные представления о вкусе), «приемлемая» цена, дизайн упаковки, формат самих сигарет (формат Super Slims). Дополнительным фактором, влияющим на решение о приобретении, является наличие необычного аромата сигарет, привычка или стереотип потребления.

По результатам исследования и с учетом сформулированных выводов были проведены преобразования в разработке программ продвижения марок. В качестве мероприятий по продви-

жению одной из торговых марок компании были сформированы следующие направления развития продукта: изменение концепции продвижения продукта, основной упор на вкусовое уникальное торговое предложение марки; новую концепцию необходимо транслировать на все доступные для табачных изделий инструменты продвижения, а именно: пресса, интернет-продвижение, упаковка и сувенирная продукция; корректировка вкуса сигарет, улучшающая соответствующий показатель; организация долгосрочной интерактивной рекламной кампании, в которой продукт продвигается через интернет-рекламу.

В процессе испытания методов продвижения продукции на практике, решение о дальнейшем использовании конкретного метода принимают в зависимости от реакции потребителей на используемый инструмент и от того, к каким объемам продаж продукции приводит эта реакция.

В сфере табачного производства производители используют все методы прямого взаимодействия с потребителями, доступные на данном рынке. В настоящее время к ним относятся: in-door реклама, но по распространению она ограничена оформлением точек продаж, промоушн-акции с привлечением совершеннолетнего промо-персонала, реклама в средствах массовой информации, механика по стимулированию сбыта для бизнес-клиентов и конечного потребителя.

К основным классическим методам продвижения, используемым повсеместно, относятся: «совершенствование самого продукта, модернизация и наращивание производственных мощностей, диверсификация и дифференцирование производства, расширение ассортимента, вариативность дизайна и технологий упаковки товаров» [9].

Все эти классические методы воздействия на поведение потребителей совершенствуются и развиваются, ориентируясь на развитие современного общества, технологий и возможностей использования нестандартных решений. Принимая во внимание все действующие ограничения на средства распространения информации о табачной продукции, производители табачных изделий направляют инвестиции на развитие самого продукта, формы упаковки, дизайна, вкусовых характеристик, расширяя функциональные выгоды для потребителя.

Упаковка на табачном рынке является одной из основных элементов успешных продаж, особенно это относится к стадии вывода нового продукта на рынок (в ситуации первой пробной покупки). Транснациональные компании вкладывают инвестиции в развитие новых форматов упаковки, что дает свои результаты.

Компания «British American Tobacco» первой выпустила на рынок новый формат упаковки и сигарет – d-shape (альтернативное название – nanotek). Данным форматом была не только расширена ассортиментная линейка, но и открыта новая перспективная ниша на табачном рынке. Далее этот формат распространился на российском рынке, но уже в исполнении других компаний-производителей.

Очень часто табачные производители в борьбе за внимание потребителей используют выпуск неограниченного количества лимитированных версий, привлекая тем самым внимание целевой аудитории к конкретному бренду, успех этих версий и срок их выпуска полностью зависит от восприятия новинки на массовом рынке.

Под лимитированными версиями подразумевается выпуск известных марок в необычной упаковке, отличной по форме, цвету, формату от стандартно выпускаемой линейки (это могут быть портсигары, промо-упаковка). При создании уникального дизайна для лимитированных версий используются модные, стильные направления в дизайне одежды, различные стили, проявляемые в искусстве, культуре различных стран и народов, т.е. тенденции, актуальные на данный момент времени.

Промо-упаковка является наиболее успешным способом продвижения продукции, положительно воспринимается потребителями, привносит выгоду для покупателя, которая проявляется в приобретении продукции по выгодной цене и получении при этом приятного подарка. Производитель, в свою очередь, получает выгоду от использования промо-упаковок, во-первых, концентрацией внимания потребителей на продукте, увеличением объема продаж, за счет предложения

покупателям дополнительной выгоды, во-вторых, увеличением количества визуальных контактов конечного потребителя с брендом, путем размещения логотипа на сувенирной продукции, вкладываемой в промо-упаковку, что увеличивает узнаваемость бренда.

Заключение. Основным эффективным методом изучения поведения потребителей на рынке табачных изделий является проведение фокус-групповых исследований. Их проводят для сбора информации об отношении потребителей к предлагаемому товару, о перспективах внедрения новинок, определения широкого спектра мнений, характерных для определенной целевой аудитории, группы населения. Применение фокус-групп позволяет не только предварительно оценить восприятие рекламы потенциальным потребителем, но и найти новые, более эффективные решения.

Табачный рынок является перспективным направлением бизнеса и, несмотря на законодательные ограничения и социальную антитабачную политику, продолжает развиваться, однако вкусовые приоритеты целевой аудитории подвержены частым изменениям. Использование фокус-группового метода изучения поведения потребителей позволяет оперативно выявить причины изменения мнений у целевой аудитории и принимать решения по оперативным действиям в течение короткого промежутка времени, что является незаменимым стратегическим преимуществом в условиях высокой конкуренции.

Качество применения конкретного метода для изучения поведения потребителей зависит от многих факторов, среди них немаловажен способ проведения исследований. Проведение опросов через Интернет, например, позволяет не только экономить бюджет, перераспределяя его на методы продвижения товаров, но и собирать информацию, регулярно обновляя ее через личные кабинеты пользователей на сайтах продуктов.

Перемены, происходящие в современной жизни, развитие технологий, позволяют применять привычные методы изучения потребительских предпочтений в тех случаях, в которых ранее не рекомендовалось, что и является предметом для всевозможных дискуссий. Оценивая качество полученных результатов, можно сделать вывод, что применение этих методов в различных областях будет способствовать расширению границ его использования.

Библиографический список

1. Позиционирование бренда [Электрон. ресурс] // PR в России. – Режим доступа: www.iteam.ru/publications/marketing/section_49/article_1307/.

2. Данченок Л.А. Маркетинг по нотам: практический курс на российских примерах. – 3-е изд. – М.: Маркет ДС, 2008.

3. Траут Дж. Новое позиционирование / Дж. Траут, С. Ривкин // Все о бизнес-стратегии №1 в мире. – СПб.: Питер, 2007.

4. Отчет ОАО «Донской табак» за 4-й квартал 2010 г. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: www.dontabak.ru.

5. Фокус-группа. Целевая аудитория [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki.

6. Маркетинг-журнал 4p.ru. Метод фокус-групп (29.10.2001) [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.4p.ru/main/theory/2380/.

7. Дэвис Д.Д. Исследования в рекламной деятельности: теория и практика / Д.Д. Дэвис; под ред. А.Г. Виноградова; пер. с англ. Е.В. Кушнеренко, О.А. Полищук. – М.: Вильямс, 2003. – 864 с.

8. Фокус-группы: разработка дизайна исследования // Маркетинговая группа ЭКРО. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: www.ecro.ru/marketing/focusgroup/design/.

9. Товары повседневного спроса, FMCG [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org.

Материал поступил в редакцию 10.05.2011.

References

1. Pozicionirovanie brenda [E`lektron. resurs] // PR v Rossii. – Rezhim dostupa: www.iteam.ru/publications/marketing/section_49/article_1307/. – In Russian.
2. Danchenok L.A. Marketing po notam: prakticheskij kurs na rossijskix primerax. – 3-e izd. – M.: Market DS, 2008. – In Russian.
3. Traut Dzh. Novoe pozicionirovanie / Dzh. Traut, S. Rivkin // Vsyo o biznes-strategii #1 v mire. – SPb.: Piter, 2007. – In Russian.
4. Otchyot OAO «Donskoj tabak» za 4-j kvartal 2010 g. [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: www.dontabak.ru. – In Russian.
5. Fokus-gruppa. Celevaya auditoriya [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://ru.wikipedia.org/wiki. – In Russian.
6. Marketing-zhurnal 4p.ru. Metod fokus-grupp (29.10.2001) [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.4p.ru/main/theory/2380/. – In Russian.
7. De`vis D.D. Issledovaniya v reklamnoj deyatel`nosti: teoriya i praktika / D.D. De`vis; pod red. A.G. Vinogradova; per. s angl. E.V. Kushnerenko, O.A. Polishhuk. – M.: Vil`yams, 2003. – 864 s. – In Russian.
8. Fokus-gruppy`: razrabotka dizajna issledovaniya // Marketingovaya gruppa E`KRO. [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: www.ecro.ru/marketing/focusgroup/design/. – In Russian.
9. Tovary` povsednevnogo sprosa, FMCG [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://ru.wikipedia.org. – In Russian.

EFFICIENT METHODS OF CONSUMER BEHAVIOR RESEARCH (CASE STUDY OF JSC 'DONSKOY TABAK' PRODUCTION)

A.A. ANTSUPOVA
(Rostov State University of Economics)

The application of control methods of consumer behavior is considered. The consumer response to the producers' promotion instruments is analyzed. Efficiency of various methods of consumer behavior research in the tobacco sphere is investigated. The list of the basic instruments for promoting tobacco production and passing the information to the end-consumer is made.
Keywords: *consumer behavior, marketing research, focus group research, focus group, techniques of group discussions.*

УДК 338.14+691

СТОИМОСТНАЯ ОЦЕНКА УЩЕРБА, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.Б. СВЕЧНИКОВ
(Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры)

Раскрыто понятие ущерба, возникающего при производстве и использовании строительных материалов, а также при ущербообразующем взаимодействии на протяжении жизненного цикла строительных компонентов. Приведены расчеты выбросов вредных веществ, в частности углекислого газа, дана оценка ущерба в стоимостном выражении.
Ключевые слова: *ущербообразующее взаимодействие, теория ущерба, техногенное влияние, жизненный цикл, экологическая оценка, экономический ущерб, экосистема, методы неформального анализа.*

Введение. В современном обществе знания об ущербе важны и необходимы для определения степени надежности или опасности многих явлений, процессов жизнедеятельности, выработки направлений развития. До настоящего времени научные представления об ущербе основывались на исследованиях отдельных его видов в той или иной области знаний. Однако существующие направления изучения различных видов ущербообразующих взаимодействий связаны между собой. Основываясь на накопленных знаниях об ущербе, необходимо выделить общие принципы, правила, закономерности возникновения ущерба в целях его оценки и предотвращения [1].

Ущерб как мера оценки. В данном аспекте ущерб от загрязнения окружающей среды может рассматриваться в нескольких основных направлениях — экономическом, социальном, экологическом, моральном. Оценка экономического ущерба имеет большую теоретическую базу в экономической науке и широкое практическое применение, при этом наибольшую трудность вызывает определение междисциплинарных типов ущерба [2]. В данной области совмещаются общие направления, в которых рассматривается взаимодействие экономических и экологических показателей, т.е. изменение экономических показателей в результате изменения экологических параметров среды. Несмотря на постоянное совершенствование методических основ количественного исчисления экономического ущерба, существующие методы имеют недостатки. Поскольку понятие экономического ущерба является единой мерой оценки техногенного влияния на различные сферы жизни общества, его расчет требует большого количества исходных данных, многие из которых либо практически не фиксируются, либо просто не поддаются формализации. Часть социального, морального, эстетического и прочего ущерба, имеющего некий экономический эквивалент, теоретически может быть выражена при помощи стоимостных оценок, однако это находится вне пределов возможностей современного экономического аппарата, поэтому расчетный экономический ущерб всегда является заниженным. Такая ситуация способствует принятию неправильного решения на этапах проектирования и строительства, что приводит к техногенным катастрофам и наиболее часто – к повреждению экосистем [3]. Экосистемой считается сочетание живых (растения и животные) и неживых компонентов (факторов), таких, как почва, воздух, вода, климат и другие на ограниченной территории. Под повреждением имеется в виду нарушение равновесия в экосистеме и снижение качества среды. При этом учитывается повреждение как экологических ценностей экосистемы, так и эстетических. Нарушение динамического равновесия может длиться десятки и сотни лет, т.е. до тех пор, пока на этой территории восстановится равновесие.

Методы управления при выборе строительных компонентов. В строительном комплексе остаются практически не решенными проблемы, связанные с использованием материалов, содержащих вредные для здоровья человека вещества. Часто оказывается, что среди широко используемых в строительстве материалов встречаются чрезвычайно опасные компоненты. Примером может служить поливинилстирол, который при горении выделяет удушающий газ (печально из-

вестный факт, когда горел ночной клуб «Хромая лошадь» в Перми). Многие синтетические смолы, применяемые при производстве древесностружечных и древесноволокнистых плит, пластмассовых изделий и пенопластов, а также хлористый винил, используемый для получения полимера поливинилхлорида (ПВХ), различных материалов на его основе — линолеума ПВХ, пленок, обоев, плитки и других – обладают токсичными свойствами. Для сравнения приведем, что ПДК для стирола составляет 0,003 мг/м^3 (максимально разовая и среднесуточная), сернистого газа – 0,5 мг/м^3 (максимально разовая) и 0,05 мг/м^3 (среднесуточная), формальдегида соответственно 0,035 и 0,012 мг/м^3. В результате воздух помещений, где человек проводит большую часть времени, оказывается в 10 раз более загрязненным.

Чтобы показать, насколько необходимой и важной является проблема оценки ущерба при создании жилой среды, приведем пример. В Сургутском районе Тюменской области при анализе воздуха квартир, собранных из панелей Пермского домостроительного комбината, было обнаружено превышение ПДК по фенолу в 40 раз, аммиаку – в 60, формальдегиду – в 400 раз. Выявлено это было случайно, во время сдачи одного из домов в эксплуатацию. А между тем сотни таких домов уже были заселены, на их строительство затрачены огромные средства. Если подсчитать ущерб, нанесенный здоровью проживающих в таких домах людей, то цена, в которую обошлось строительство, будет на порядок выше.

Как стало известно, Пермский домостроительный комбинат, стремясь удешевить строительство жилья, заменил минеральную вату, обычно применяемую в качестве утеплителя, на пенопласт. Но пенопласт выделяет во много раз больше токсичных испарений, чем минеральная вата. Кроме того, на комбинате было введено еще одно новшество. В деревянных панелях фанеру заменили древесностружечной плитой. Не было принято во внимание, что эта плита в сотни раз более проницаема для испарений, чем фанера, а также то, что древесностружечные плиты склеены смолами, выделяющими собственные токсины.

Отсутствие строгого экологического контроля в жилищном строительстве – проблема, которая требует срочного решения.

Рассмотрим некоторые исходные данные, которые помогут определить эколого-экономический ущерб на протяжении всего жизненного цикла конструкционного материала [4].

На этапе проектирования сооружения необходимо определить срок годности различных материалов, строительных элементов и всего здания и оценить долговечность всей конструкции. Высокий показатель долговечности правильно подобранных материалов для строительства от фундамента до крыши означает, что выбранные компоненты долго сохраняют свои свойства и имеют больший срок эксплуатации до ремонта или замены изделия. Благодаря продлению срока использования материала, нагрузка на окружающую среду на этот период уменьшается. Соответственно, достигается экономия средств от наименьших инвестиций в восстановление окружающей среды. Для сохранения окружающей среды и здоровья человека важно, чтобы долговечность компонентов отдельных строительных узлов всегда соответствовала жизненному периоду всего здания.

С точки зрения экономики, для уменьшения затрат на этапах добычи и производства сырья важно перерабатывать сопутствующие отходы и увеличивать долю выхода продукции, а не складировать отходы на полигонах и в отстойниках.

На этапе строительства отказ от строительных материалов, содержащих вредные вещества, может быть основан на показателях, характеризующих качество внутренней среды в здании (эмиссия из них вредных веществ в воздух помещений, влажность, шум и т. д.).

На этапе эксплуатации здания экологическая нагрузка в большой мере определена выбором, сделанным на предыдущих этапах, здесь дополнительно необходимо определить эксплуатационные затраты по уходу за материалами для сохранения их свойств.

Стоимостная оценка ущерба. Для стоимостной оценки ущерба от выбросов вредных веществ различными строительными материалами воспользуемся зарубежным опытом. В частности, во

Франции с 2010 г. законодательно закреплено отчислять денежные средства в государственную казну за выбросы углекислого газа от сжигания ископаемого топлива — нефти, газа и угля. С налогоплательщиков взимается по 32 евро за каждую тонну выброшенного в атмосферу углекислого газа, или в пересчете на рубли по действующему курсу 1,3 руб. за 1 кг CO_2 [5].

Стоимостная оценка ущерба от выброса диоксида углерода используемых в строительстве конструкционных материалов, полученная с применением данной ставки, сведена в таблицу.

Стоимостная оценка показателей выброса CO_2
используемых в строительстве конструкционных материалов

Конструкция	Строительный материал	Ущерб от выброса CO_2 1 $м^2$ материала за год, руб.
Перекрытия/полы	Бетон	3,1
	Деревянные балки	1,6
	Деревянные балки, бетонные соединения	1,6
	Сборные деревянные элементы	1,6
Крыша	Бетон	2,9
	Битумные материалы	4,2
	ПВХ	2,4
Коробка здания/стены	Кирпич, фиброцемент	2,8
	Песчаник известняковый	1,6
	Ячеистый бетон	1,8

Если учесть все вредные испарения материалов на синтетической основе, ущерб, возникающий при их добыче, изготовлении и утилизации, и умножить на период эксплуатации (минимум 30 лет) и площадь ежегодно вводимых зданий, то экономический ущерб, наносимый окружающей среде и здоровью человека, будет значительным.

К сожалению, современный экономический аппарат не позволяет точно оценить экономический ущерб, несмотря на его очевидную практическую потребность в различных сферах деятельности. В силу сложности самого понятия ущерба от загрязнения окружающей среды «абсолютно объективные» оценки в принципе невозможны. Ввиду этого, необходимо, прежде всего, определить цель исследования, в зависимости от которой в каждом конкретном случае будут определяться соответствующие модели с определенными допущениями и адекватные расчетные методики.

На последнем этапе жизненного цикла материала встает вопрос об оценке возможности его повторного использования без дополнительной переработки (например, повторное использование деревянных дверей, оконных рам и т.п.). Поэтому критерием для экологической оценки материала становится возможность его реставрации, ремонтопригодность. Реставрацией или бережным уходом за конструкциями и материалами можно удлинить срок их пригодности. В этом случае количество строительных отходов может быть сокращено. В связи с возможностью повторного использования очень важно, чтобы не было трудностей с сортировкой и очищением материалов. Если отходы после сноса здания попадут в окружающую среду (свалки и т.п.), то экологическая нагрузка будет определяться сочетанием их вредности и разлагаемости в природной среде. При эффективной биоразлагаемости отходы практически не оказывают вредного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. На протяжении всего жизненного цикла строительного материала, среда, где он применяется, испытывает экологическую нагрузку, т.е. загрязнение. На каждом этапе жизни материал по-разному влияет на окружающую среду.

Использование аналитической схемы оценки нагрузок на окружающую среду по жизненному циклу позволяет дать качественную экологическую оценку любому строительному материалу, а также подсчитать экономический ущерб, нанесенный им в стратегическом периоде. Данная схема позволяет прогнозировать наиболее существенные риски, что дает возможность выбирать

более долговечные и экологичные материалы на каждом этапе жизненного цикла: от добычи сырья до утилизации конструкции.

В европейских странах принято каждому строительному элементу присваивать индексы по следующим экологическим факторам (стандартам): повреждение экосистем, дефицитность сырья (дефицит), эмиссия вредных веществ в окружающую среду (выбросы), затраты энергии (потребление энергии), здоровье человека и «экологическое здоровье» (здоровье), а также положение с отходами (отходы).

Данные экофакторы являются показателями экологического качества материала или, другими словами, являются показателями экологических свойств материала. Индексы перечисленных показателей, широко используются сегодня в мировой практике экологической оценки строительных материалов в рамках стандартов ИСО-14000.

Заключение. Исследования показали, что в России системы экологического контроля (мониторинга) жилой среды еще не созданы. Методики экономической оценки строительных материалов по их жизненному циклу не внедрены, поэтому актуальным остается тщательное экологическое исследование и оценка безопасности всех строительных материалов, содержащих вещества, опасные для здоровья. Часто эта проблема незаслуженно остается вне поля зрения не только специалистов в области жилищного строительства, но и экологов. Это указывает на необходимость разработки принципиально новых подходов, теорий, либо методов неформального анализа. Уже существуют некоторые изыскания с точки зрения теории рисков, общественного выбора, социального благоденствия, простого и расширенного воспроизводства. Применяемые методы рыночной оценки – затратный метод, методы альтернативной стоимости, стоимости риска ущерба, стоимости существования и многие другие – позволяют спрогнозировать ожидаемый ущерб и минимизировать затраты на восстановление окружающей природной среды.

Библиографический список

1. Тулупов А.С. Теория ущерба: общие подходы и вопросы создания методического обеспечения / А.С. Тулупов; Ин-т проблем рынка РАН. – М.: Наука, 2009. – 284 с.

2. Абалкина И.Л. Управление риском в индустриальном обществе: безопасность человека / И.Л. Абалкина // Тр. вольного экон. о-ва России. – М., 1997. – С.88-101.

3. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://ecovolgograd.by.ru/ekonomocenka.html.

4. Экономическая оценка ущерба от загрязнений на окружающую природную среду [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.bgti.ru/priroda_u4/txt/part5-2-2_.htm.

5. С 2010 г. все французы будут платить из личного кармана за CO_2 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://energyfuture.ru/s-2010-goda-vse-francuzy-budut-platit-iz-lichnogo-karmana-za-CO_2.

Материал поступил в редакцию 14.04.2011.

References

1. Tulupov A.S. Teoriya ushherba: obshhie podxody` i voprosy` sozdaniya metodicheskogo obespecheniya / A.S. Tulupov; In-t problem ry`nka RAN. – M.: Nauka, 2009. – 284 s. – In Russian.

2. Abalkina I.L. Upravlenie riskom v industrial`nom obshhestve: bezopasnost` cheloveka / I.L. Abalkina // Tr. vol`nogo e`kon. o-va Rossii. – M., 1997. – S.88-101. – In Russian.

3. Vremennaya metodika opredeleniya predotvrashhyonnogo e`kologicheskogo ushherba [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://ecovolgograd.by.ru/ekonomocenka.html. – In Russian.

4. E`konomicheskaya ocenka ushherba ot zagryaznenij na okruzhayushhuyu prirodnuyu sredu [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.bgti.ru/priroda_u4/txt/part5-2-2_.htm. – In Russian.

5. S 2010 g. vse franczuzy` budut platit` iz lichnogo karmana za CO_2 [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://energyfuture.ru/s-2010-goda-vse-francuzy-budut-platit-iz-lichnogo-karmana-za-CO_2. – In Russian.

COST ESTIMATE OF ECONOMIC DISBENEFIT IN BUILDING MATERIALS PRODUCTION AND USE

N.B. SVECHNIKOV
(Surgut State University, Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra)

The concept of damage ensuing in the production and use of the building materials, and during damaging contacting throughout the life cycle of the building components is described. Calculations of the emissions of harmful substances, in particular carbon dioxide, are resulted. The damage evaluation is given in value terms.
Keywords: *damaging contacting, damage theory, technogenic impact, life cycle, ecological evaluation, economic disbenefit, ecosystem, methods of informal analysis.*

УДК 336.7

ОЦЕНКА КРЕДИТНОГО ПОРТФЕЛЯ КОММЕРЧЕСКОГО БАНКА

Л.В. СПИРИДОНОВА
(Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры)

Проанализированы различные понятия кредитного портфеля банка, проведено их сравнение, дано определение, позволяющее структурировать кредитный портфель. Подробно рассмотрены методики его оценки, закрепленные на законодательном уровне и используемые в настоящее время в РФ. Сделан вывод о необходимости двойной оценки кредитного портфеля в целях предоставления обязательной отчетности и принятия стратегических решений.
***Ключевые слова**: банк, кредитный портфель, кредитный риск.*

Введение. Традиционным видом банковской деятельности является кредитование. Это основная операция, обеспечивающая доходность и стабильность существования большинства банков. От того насколько эффективно банк будет оценивать свой кредитный портфель зависит его место на рынке, а следовательно, и его востребованность.

Анализ методик оценки качества кредитного портфеля коммерческого банка, закрепленных на законодательном уровне РФ. Отечественные специалисты приводят различные толкования понятия «кредитный портфель». Под портфелем (от франц. portefeuille, porte – носить и feuille – лист) понимается «совокупность форм и видов экономической, финансовой деятельности, соответствующих им документов, денежных средств, заказов, объектов» [1]. При этом под определение портфеля также попадает и совокупность ссуд, выдаваемых банками. В свою очередь, специалисты-практики под кредитным портфелем понимают общую совокупность предоставленных заемщикам ссуд, в том числе и проблемных [2]. Западные подходы к определению кредитного портфеля опираются на международные стандарты финансовой отчетности, а также на рекомендации соглашения Базель II, которые под кредитным портфелем понимают «совокупность доходных активов» [3].

Исходя из приведенных определений, видно, что нет однозначности в понимании термина «кредитный портфель» банка. Все сходятся на мнении что, выдавая кредиты физическим и юридическим лицам, банк формирует свой кредитный портфель, при этом состав этого портфеля у всех различен. Мы считаем, что кредитный портфель коммерческого банка – это совокупность предоставленных заемщикам (физическим и юридическим лицам) ссуд на условиях срочности, платности и возвратности. На наш взгляд, кредитный портфель состоит из нескольких составляющих и характеризуется не только размером, но и структурой (табл.1).

Таблица 1

Структура кредитного портфеля коммерческого банка

Составляющие кредитного портфеля	Доля в общем объеме
Кредиты юридическим лицам	
Кредиты физическим лицам	
Межбанковские кредиты (МБК) сроком свыше 30 дней	
Учет и авалирование векселей третьих лиц (торговый портфель)	
Факторинговые операции с юридическими лицами	
Факторинговые операции с физическими лицами	
Маржинальное кредитование	
Итого:	100%

Структура кредитного портфеля представляет собой соотношение конкретных видов кредитных операций в портфеле. Банк управляет кредитным портфелем посредством изменения до-

ли каждой составляющей (столб.2, табл.1) таким образом, чтобы сформированная структура портфеля обеспечивала оптимальное сочетание показателей доходности, риска и ликвидности.

В периоды экономических кризисов и рецессий правильно и грамотно сформированный кредитный портфель является главным фактором выживания банка на рынке. В понятие «грамотно сформированный кредитный портфель» мы вкладываем следующий смысл: 1) решение по каждой сделке должно приниматься исходя из текущего состояния кредитного портфеля. Несмотря на то, что кредитный риск порождают отдельные заемщики, при объединении кредитов различных заемщиков в портфель риски могут увеличиваться или уменьшаться. Следовательно, при формировании кредитного портфеля необходимо отталкиваться от общего состояния портфеля и определять повысит или понизит данный заемщик общий риск портфеля в текущий момент времени; 2) решение по кредиту должно приниматься в соответствии с утвержденной кредитной политикой банка, проводимой сверху вниз и хорошо понимаемой на всех уровнях, позволяющей руководству поддерживать стандарты в области кредитов, избегать излишнего риска и верно оценивать возможности дальнейшего развития банка.

Значительно возросшие проблемные долги, постоянно снижающаяся ставка рефинансирования ЦБ РФ, перевели проблему управления кредитным портфелем и его оценку в разряд наиболее актуальных и важных [4]. Особенно, если учесть рост темпов кредитования. В ноябре 2010 г. российские банки увеличили объемы выданных кредитов нефинансовому сектору на 1,6% (прирост за 11 мес. 2010 г. составил 10,9%, против 1,5% в соответствующем периоде 2009 г.), физическим лицам – на 1,5% (прирост за 11 мес. 2010 г. 11,9%, за 2009 – 10,7%) [5]. Принимая и реализуя ту или иную стратегию соотношения риска и доходности (высокорискованная, низкорискованная, умеренная) банк может не получить желаемые результаты, что приводит к увеличению доли проблемных активов. Для того, чтобы избежать ошибок нужно оценивать качество банковского кредитного портфеля, который неразрывно связан с финансовым положением заемщиков. Под оценкой нами понимается количественная и качественная характеристика уровня кредитного риска. При этом результатом количественной оценки кредитного риска является расчет значений показателей кредитного риска в процессе его мониторинга, результатом качественной – мотивированное суждение о существенности кредитного риска в процессе его мониторинга.

Исследуем современные практические методы оценки кредитного портфеля, используемые банками в настоящее время.

На законодательном уровне Центральный банк РФ определяет подходы к количественной оценке кредитного риска.

В Инструкции 110-И Банком России для оценки банковского кредитного портфеля установлены нормативы кредитного риска: Н6 (максимальный размер риска на одного заемщика или группу связанных заемщиков), Н7 (максимальный размер крупных кредитных рисков), Н9.1 (максимальный размер кредитов, банковских гарантий и поручительств, предоставленных банком своим участникам (акционерам), Н10.1 (совокупная величина риска по инсайдерам банка), Н12 (норматив использования собственных средств (капитала) для приобретения акций (долей) других юридических лиц, рассчитываемые в обязательном порядке на ежедневной основе [6].

На наш взгляд, обязательные нормативы ЦБ РФ в отношении коммерческих организаций оценивают уровень риска кредитного портфеля в текущий период и не способны определить его на перспективу, что является очень важным аспектом с позиции управления рисками.

Основополагающим документом, регламентирующим порядок мониторинга кредитного риска заемщика, является Положение №254-П, в котором под кредитным риском понимается «обесценение ссуды, т.е. потеря ссудной стоимости вследствие неисполнения либо ненадлежащего исполнения заемщиком обязательств по ссуде перед кредитной организацией, либо вследствие существования реальной угрозы такого неисполнения (ненадлежащего исполнения)». В данном случае размер резерва отражает величину возможных потерь кредитной организации. Указанное

положение подробно описывает порядок оценки кредитного риска в целях формирования кредитными организациями резервов на возможные потери и минимизации убытков банка. Он заключается в следующем – банки формируют тот или иной размер резерва в зависимости от присвоенной категории качества на основании профессионального суждения. Как правило, выделяют пять категорий качества, начиная от стандартных ссуд, когда вероятность финансовых потерь вследствие неисполнения либо ненадлежащего исполнения обязательств по ссуде равна нулю и заканчивая безнадежными ссудами, когда вероятность невозврата составляет 100%. При этом размер резерва варьирует в зависимости от той или иной категории качества ссуды (табл.2).

Таблица 2

Величина резерва в зависимости от категории качества
с учетом финансового положения заемщика и качества обслуживания долга [7]

Финансовое положение	Обслуживание долга		
	Хорошее	Среднее	Неудовлетворительное
Хорошее	Стандартная (0%) (I категория качества)	Нестандартная (1-20%) (II категория качества)	Сомнительная (21-50%) (III категория качества)
Среднее	Нестандартная (1-20%) (II категория качества)	Сомнительная (21-50%) (III категория качества)	Проблемные (51-100%) (IV категория качества)
Плохое	Сомнительная (21-50%) (III категория качества)	Проблемные (51-100%) (IV категория качества)	Безнадежная (100%) (V категория качества)

Таким образом, присвоение ссуде соответствующей категории качества на основе двух критериев: финансовое положение заемщика и обслуживание долга – фактически являются оценкой риска. Данная оценка позволяет банку принять решение о формировании резерва на возможные потери в целях минимизации отрицательного эффекта потенциального дефолта заемщика на финансовое состояние банка. Но на наш взгляд, излишне варьирует размер резерва, размах которого составляет 19-49%. Считаем, что целесообразно определять размер резерва не только исходя из категории качества ссуды, но и исходя из внутреннего кредитного рейтинга заемщика (банка-контрагента), который предлагаем ввести дополнительно. Введение дополнительного критерия оценки позволит получить необходимые данные по объему создаваемых резервов, снизить относительные потери и увеличить доходы банков, что особенно актуально в настоящее время.

Рассмотрим Указания ЦБ РФ №2005-У и №1379-У. Согласно указанию №1379-У, в целях оценки финансовой устойчивости кредитных организаций предлагается рассчитывать группы показателей: 1) оценки капитала; 2) оценки активов; 3) оценки качества управления банком, его операциями и рисками; 4) оценки доходности; 5) оценки ликвидности. Однако существенным недостатком данного положения стало то, что не было учтено разное влияние факторов на качество управления. Считалось, что все факторы оказывают равное влияние. Данный недостаток был устранен в Указании 2005-У, при этом оно еще дополнилось показателями прозрачности и структуры капитала. В данном случае нас интересуют показатели оценки активов банка. Отметим, что оценка активов отдельно не выделяет оценку качества кредитного портфеля, но сами показатели касаются именно ссудной задолженности. Среди них: показатель качества ссуд, показатель риска потерь, показатель доли просроченных ссуд, показатель размера резервов на потери по ссудам и иным активам, показатель концентрации крупных кредитных рисков, показатель концентрации кредитных рисков на акционеров (участников), показатель концентрации кредитных рисков на инсайдеров, обобщающий результат по группе показателей оценки активов [8, 9].

Таким образом, рассчитав обобщающий результат по группе показателей оценки активов, можно охарактеризовать состояние активов банка как хорошее; удовлетворительное; сомнительное либо неудовлетворительное.

Методология стресс-тестирования играет важную роль в оценке рисков, позволяя оценивать стоимость кредитного портфеля в условиях экономического кризиса. Банк России определяет стресс-тестирование как «оценку потенциального воздействия на финансовое состояние кредит-

ной организации ряда заданных изменений в факторах риска, которые соответствуют исключительным, но вероятным событиям» [10]. Сущность данного метода состоит в определении стоимости кредитного портфеля при изменении как отдельного негативного фактора риска, так и их совокупности, влияющих на кредитный портфель (рост/снижение процентных ставок, рост просроченных кредитов, снижение объема собственного капитала, уровень инфляции, приток / отток вкладов и пр.). Итогом проведения стресс-тестирования является оптимизация имеющегося в банке кредитного портфеля, которая заключается в разработке плана действий по его изменению в приемлемую для банка сторону. Осознавая всю важность вопроса и контроля управления рисками, коммерческие организации разрабатывают собственные модели чувствительности и сценарные модели стресс-тестирования (сценарии «шока»). Анализ чувствительности портфеля активов заключается в изменении факторов риска и расчете максимально возможных потерь в краткосрочной перспективе, при этом сценарный анализ предполагает одновременное воздействие ряда факторов на деятельность банка в целях определения его стратегических перспектив. Для этого применяются однофакторные или многофакторные, систематические и несистематические сценарии. Таким образом, оценка, позволяющая спрогнозировать реакцию банка на изменения тех или иных факторов макро- и микроэкономической среды, является для него крайне полезной, поэтому они прибегают к ней довольно часто.

При оценке кредитного портфеля немаловажную роль стоит отводить оценке концентрации портфеля. Концентрация подразумевает требования, которые могут привести к убыткам, или вовсе приостановлению основной деятельности банка. Заметим, что в российской практике, как правило, ограничены лишь риски концентрации на одного заемщика (или группу связанных заемщиков), риски в отношении акционеров (участников) и инсайдеров. При этом на другие направления деятельности банка количественные ограничения отсутствуют. На наш взгляд, банкам стоит самостоятельно установить ограничения на региональную и отраслевую концентрации кредитного портфеля и закрепить их во внутренних нормативных документах банка. Считаем, что особую актуальность данные ограничения будут иметь во время возникновения проблем у мелких и средних банков в периоды напряженности, в том числе экономических кризисов. Ведь, как известно, кризис 2008-2009 гг. краткосрочно, но сильно ударил по нефтяной, газовой отраслям, что привело к негативным последствиям для банков (увеличение просроченной задолженности со стороны заемщиков, рост неплатежей и др.). Следовательно, риски следует перераспределять в целях предотвращения возможных потерь, иначе, по мнению британского ученого Ш. Хефферна, слабое управление активами, приведет к выдаче сомнительных кредитов и итогом слабо диверсифицированного кредитного портфеля станет крах банка [11].

Выводы. Существующие на законодательном уровне методики в области оценки кредитного портфеля банка не удовлетворяют потребностям банка, так как содержат недостатки, выявленные в процессе исследования. Это приводит к тому, что банки вынуждены разрабатывать собственные методики оценки кредитного портфеля в целях принятия стратегических решений по управлению рисками. Поэтому зачастую оценка кредитного риска в коммерческих банках проводится в двух видах: 1) оценка риска в целях предоставления обязательной отчетности регулирующим органам; 2) оценка рисков для принятия стратегических решений по управлению рисками в отношении кредитной организации, осуществляемой на основе внутренней отчетности, что, в свою очередь, приводит к дополнительным трудозатратам.

Библиографический список

1. Борисов А.Б. Большой экономический словарь / А.Б. Борисов. – М.: Книжный Мир, 2007. – 860 с.

2. Бухтин М.А. Методы оценки показателей кредитного риска / М.А. Бухтин // Оперативное управление и стратегический менеджмент в коммерческом банке. – 2005. – №2. – С.70-91.

3. Credit Risk Modelling: Current Practices and Applications. Basel Committee on Bank Supervision, 1999. – P.10.
4. Данные Центрального Банка РФ [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://cbr.ru.
5. Обзор банковского сектора РФ. Аналитические показатели №99, январь 2011 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://cbr.ru/analytics/bank_system/obs_ex.pdf
6. Инструкция ЦБ РФ от 16.01.2004, №110-И «Об обязательных нормативах банков» (с учетом изменений и дополнений от 08.11.10).
7. Положение ЦБ РФ от 26.03.2004, №254-П «О порядке формирования кредитными организациями резервов на возможные потери по ссудам, по ссудной и приравненной к ней задолженности» (с учетом изменений и дополнений от 03.06.2010).
8. Указание ЦБ РФ от 16.04.2004, №1379-У «Об оценке финансовой устойчивости банка в целях признания ее достаточности для участия в системе страхования вкладов» (с учетом изменений и дополнений от 27.10.2009).
9. Указание ЦБ РФ от 30.04.2008, №2005-У «Об оценке экономического положения банков» (с учетом изменений и дополнений от 05.08.2009).
10. Подходы к организации стресс-тестирования в кредитных организациях [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.cbr.ru/analytics/bank_system/print.asp?file=stress.htm
11. Хеффернан Ш. Основные факторы крахов западных банков / Ш. Хеффернан // Сб. аналит.-рефератив. материалов ИНИОН РАН «Банковское дело: зарубежный опыт». – 1998. – №11. – С.24-33.

Материал поступил в редакцию 30.03.2011.

References

1. Borisov A.B. Bol`shoj e`konomicheskij slovar` / A.B. Borisov. – M.: Knizhny`j Mir, 2007. – 860 s. – In Russian.
2. Buxtin M.A. Metody` ocenki pokazatelej kreditnogo riska / M.A. Buxtin // Operativnoe upravlenie i strategicheskij menedzhment v kommercheskom banke. – 2005. – #2. – S.70-91. – In Russian.
3. Credit Risk Modelling: Current Practices and Applications. Basel Committee on Bank Supervision, 1999. – P.10.
4. Danny`e Central`nogo Banka RF [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://cbr.ru. – In Russian.
5. Obzor bankovskogo sektora RF. Analiticheskie pokazateli #99, yanvar` 2011 [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://cbr.ru/analytics/bank_system/obs_ex.pdf. – In Russian.
6. Instrukciya CZB RF ot 16.01.2004, #110-I «Ob obyazatel`ny`x normativax bankov» (s uchyotom izmenenij i dopolnenij ot 08.11.10). – In Russian.
7. Polozhenie CZB RF ot 26.03.2004, #254-P «O poryadke formirovaniya kreditny`mi organizaciyami rezervov na vozmozhny`e poteri po ssudam, po ssudnoj i priravnennoj k nej zadolzhennosti» (s uchyotom izmenenij i dopolnenij ot 03.06.2010). – In Russian.
8. Ukazanie CZB RF ot 16.04.2004, #1379-U «Ob ocenke finansovoj ustojchivosti banka v celyax priznaniya eyo dostatochnosti dlya uchastiya v sisteme straxovaniya vkladov» (s uchyotom izmenenij i dopolnenij ot 27.10.2009). – In Russian.
9. Ukazanie CZB RF ot 30.04.2008, #2005-U «Ob ocenke e`konomicheskogo polozheniya bankov» (s uchyotom izmenenij i dopolnenij ot 05.08.2009). – In Russian.

10. Podxody` k organizacii stress-testirovaniya v kreditny`x organizaciyax [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.cbr.ru/analytics/bank_system/print.asp?file=stress.htm. – In Russian.

11. Xeffernan Sh. Osnovny`e faktory` kraxov zapadny`x bankov / Sh. Xeffernan // Sb. analit.-referativ. materialov INION RAN «Bankovskoe delo: zarubezhny`j opy`t». – 1998. – #11. – S.24-33. – In Russian.

ASSESSMENT OF CREDIT PORTFOLIO OF COMMERCIAL BANK

L.V. SPIRIDONOVA
(Surgut State University, Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra)

Various concepts of the bank credit portfolio are analyzed and contrasted. The definition that permits to structure the credit portfolio is given. The existing techniques of its assessment formalized in legislation and used now in the Russian Federation are considered in detail. The necessity of the double estimation of the credit portfolio with the aim of accounting and controlling is derived.
Keywords: *bank, credit portfolio, credit risk.*

УДК 339.138

ФОРМИРОВАНИЕ КОНКУРЕНТНЫХ СТРАТЕГИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ НА ПРОДОВОЛЬСТВЕННОМ РЫНКЕ

О.В. ХЛОПЕНКО
(Донской государственный технический университет)

Представлены рекомендации по выбору конкурентных стратегий предприятиями розничной торговли продуктами питания в зависимости от их стратегической конкурентной позиции.
Ключевые слова: *конкурентная стратегия, конкурентное преимущество, стратегические группы конкурентов, потребительское поведение.*

Введение. Обеспечение конкурентоспособности предприятий услуг розничной торговли во многом определяется формированием адекватных условиям обслуживаемых рынков конкурентных стратегий. Под стратегией предприятия понимается интегрированная модель действий, предназначенных для достижения целей предприятия [1]. Содержанием стратегии служит набор правил принятия решений, используемый для определения основных направлений деятельности.

Существуют два противоположных взгляда на понимание стратегии. В первом случае стратегия – это конкретный долгосрочный план достижения некоторой цели, а выработка стратегии – это процесс нахождения некоторой цели и составление долгосрочного плана. Такой подход основывается на том, что все возникающие изменения предсказуемы, происходящие в среде процессы носят детерминированный характер и поддаются полному контролю и управлению [2, 3].

Во втором случае под стратегией понимается долгосрочное качественно определенное направление развития предприятия, касающееся сферы, средств и формы его деятельности, системы внутрипроизводственных отношений, а также позиций предприятия в окружающей среде. При таком понимании, стратегию можно охарактеризовать как выбранное направление деятельности, функционирование которого должно привести организацию к достижению стоящих перед ней целей [4, 5].

Для проводимого исследования использован второй подход к пониманию стратегии. Успешная реализация конкурентной стратегии обеспечивает эффективное функционирование и развитие предприятия любой отрасли. Многие авторы считают, что между конкурентной стратегией и конкурентными преимуществами существует тесная взаимосвязь, которая заключается в том, что конкурентная стратегия направлена на достижение устойчивых и долговременных конкурентных преимуществ по отношению к основным конкурентам.

Назначение конкурентной стратегии заключается в том, чтобы привести в строгое соответствие внутренние возможности (способности) предприятия с условиями, диктуемыми внешней бизнес-средой [6], при этом учитывают факторы, характеризующие состояние отрасли и условия конкуренции, а также факторы, характеризующие конкурентные возможности предприятия и его рыночную позицию. В результате конкурентная стратегия определяет, каким образом организация будет конкурировать на рынке, который она выбрала для обслуживания, на какие конкурентные преимущества будет опираться. Наличие конкурентных преимуществ, а также конкурентных недостатков предприятия определяет его конкурентную стратегию.

Конкурентные стратегии предприятий розничной торговли. В ходе исследования продовольственного рынка Ростова-на-Дону были выделены основные конкурентные преимущества и недостатки стратегических групп конкурентов (табл.1). Результаты сегментирования конкурентов на городском рынке розничной торговли продовольственными товарами использовались для разработки рекомендаций по выбору конкурентных стратегий предприятиями данной сферы, при этом учитывалась линия потребительского поведения в отношении каждой стратегической группы конкурентов.

Таблица 1

Преимущества и недостатки стратегических групп конкурентов предприятий розничной торговли продовольственными товарами

Стратегические группы конкурентов	Конкурентные преимущества	Недостатки
Магазин в шаге от дома	– расположение внутри «спальных» районов; – товары повседневного спроса; – товары известных производителей; – круглосуточный режим работы.	– узкий ассортимент; – малое помещение; – цены выше, чем в сетевых магазинах и супермаркетах; – обслуживание через прилавок.
Мономагазины (узкоспециализированные предприятия)	– расположение в «спальных» районах; – постоянные поставщики товаров; – глубокий ассортимент товаров.	– узкий ассортимент; – малочисленность покупателей.
Магазины-дискаунтеры	– низкие цены; – удобное расположение вблизи жилья; – ассортимент составляют товары определенной категории; – самообслуживание; – режим работы «без перерывов и выходных»	– низкое качество продуктов; – ограниченный ассортимент; – отсутствие сопутствующих товаров; – товары неизвестных производителей.
Фирменные магазины производителей	– высокое качество продукции; – исчерпывающий ассортимент продукции производителя; – цены ниже среднерыночных; – расположение в центре города; – наличие постоянных покупателей.	– представляется продукция только одного производителя.
Магазины с VIP-продукцией	– расположение, преимущественно, в центре города; – широкий ассортимент продуктов класса Премиум; – наличие повседневной продукции по средним ценам; – наличие дополнительных услуг по доставке продуктов и т.д.; – высокое качество обслуживания покупателей; – использование современных электронных технологий.	– высокие цены; – наличие продукции неизвестного зарубежного производителя; – ограниченный круг покупателей.
Универсамы (супермаркеты)	– средние цены; – широкий ассортимент продовольственных товаров; – наличие сопутствующего непродовольственного товара; – достаточная близость к потребителю; – наличие дополнительных услуг; – продукция известных поставщиков; – использование электронных технологий.	– отсутствие покупательских скидок; – цены выше, чем в корпоративных сетевых магазинах.
Корпоративные торговые сети: – сети-дискаунтеры; – сети, поддерживающие среднерыночный уровень цен; – сети, в ассортименте которых продовольственная продукция класса Премиум.	– расположение по всем жилым массивам города; – охват большого количества покупателей; – широкий ассортимент продовольственных товаров; – самообслуживание и через прилавок; – предоставление дисконтных карт; – устойчивое финансовое положение; – возможность диктовать условия поставщикам; – высокий уровень логистики.	– разный уровень цен; – ограниченность ассортимента в сетях-дискаунтерах; – наличие товаров неизвестного производителя в сетях-дискаунтерах; – отсутствие дополнительных услуг в большинстве магазинов корпоративных торговых сетей.

При разработке рекомендаций по выбору конкурентных стратегий за основу была взята классификация конкурентных стратегий, предложенная М. Портером [7], а также классификация Ф. Котлера [8].

По мнению М. Портера, стратегия конкурентной борьбы – это оборонительные или наступательные действия, направленные на достижение прочных позиций предприятия в отрасли [7]. При этом он выделяет только три внутренне непротиворечивые и успешные стратегии: минимизация издержек; дифференциация; концентрация (фокусирование).

Стратегия минимизации издержек основана на достижении уровня издержек реализации товаров ниже основных конкурентов, при этом качество продукции должно быть не ниже среднеотраслевого. Стратегия основывается на высокой производительности труда и всемерной экономии издержек.

В качестве альтернативы лидерству в минимизации издержек М. Портер предлагает дифференциацию продукта, т.е. его отличие от остальных в отрасли. Данная стратегия основана на способности предприятия показать уникальность (по сравнению с конкурентами) товара для покупателя с точки зрения уровня качества, наличия его особых характеристик, методов сбыта, послепродажного обслуживания.

Стратегия фокусирования, в свою очередь, основана на выборе узкой сферы (цели) конкуренции. Фирма выбирает сегмент рынка или рыночную нишу и пытается достичь конкурентных преимуществ применительно к особенностям данного сегмента.

Стратегии М. Портера следует рекомендовать выделенным стратегическим группам предприятий сферы розничной торговли продовольственными товарами.

Первая группа предприятий – «магазины в шаге от дома» – располагает ассортиментом товаров повседневного спроса известных производителей и имеет круглосуточный режим работы, что позволяет покупателям приобрести необходимые продовольственные товары недалеко от своего жилья.

Представители данной группы конкурентов, как правило, небольшие предприятия. Этой группе розничных предприятий рекомендуется использовать стратегию фокусирования, основанную на дифференциации потребности покупателей, что позволяет оптимизировать ассортимент продовольственных товаров, совершенствовать обслуживание. Торговым предприятиям данной группы следует предлагать покупателям товары первой необходимости: колбасные изделия, молочные продукты и хлебобулочную продукцию. Оптимизация ассортимента продовольственных товаров состоит в том, чтобы сократить товарные группы неизвестных производителей, выявить и исключить из ассортимента невостребованные товары.

Вторая группа – «мономагазины» (узкоспециализированные предприятия), чаще всего расположенные в «спальных» районах города или торговых центрах, имеют глубокий ассортимент и постоянных поставщиков. Магазины этой группы представлены дочерними предприятиями производителей, а также малыми и средними предприятиями, например, «Мясная лавка» ОАО «Тавр», ООО «Домашняя курочка», ООО «Свежая рыба», ООО «Два капитана», ООО «Овощи», ООО «Океан», ООО «Золотой колос», ООО «Итальянский квартал» и другие.

Стратегической группе «мономагазины» следует рекомендовать использование стратегии фокусирования, которая основана на дифференциации предлагаемого товара при условии, что рыночная ниша имеет достаточный размер для обеспечения необходимой прибыльности предприятия. Рекомендуемая стратегия предполагает не территориальное фокусирование, как в предыдущей группе, а фокусирование на определенной товарной группе. Дифференциация предлагаемых продовольственных товаров заключается в широкой товарной линейке, т.е. наличие в ассортименте магазина как недорогих товаров, так и товаров класса Премиум.

Магазины-дискаунтеры, составляющие третью стратегическую группу конкурентов, включают в ассортимент товары определенной категории, чаще всего товары первой необходимости, по низким ценам, имеют удобный режим работы – «без перерыва и выходных». Этой группе роз-

ничных предприятий рекомендуется стратегия лидерства в издержках, так как эти магазины рассчитаны на широкий охват рынка, в том числе и территориальный. Предполагается, что наличие продовольственных товаров первой необходимости по низким ценам привлечет в магазины-дискаунтеры покупателей разных социальных категорий (пенсионеры, студенты, многодетные семьи и т.п.) не только из микрорайонов, где расположено предприятие, но и из всех жилых массивов города.

Четвертой группе конкурентов – «фирменные магазины производителей» – следует использовать стратегию фокусирования, основанную на дифференциации производимых товаров, так как эта стратегия основана на достижении высокого уровня разнообразия и уникальности предложения, например, ОАО «Тавр», ОАО «Микоян», ООО «Черкизовский», ОАО «Вимм-Билль-Данн» и др.

Достоинством этой стратегии является ее базирование на конкурентных преимуществах высокого порядка: высокое качество продукции, исчерпывающий ассортимент продукции производителя, хорошая репутация предприятия-производителя и др. В данной ситуации предполагается широкая товарная линейка производителя, включающая в себя продукцию ежедневного потребления и деликатесную продукцию. Следовательно, магазины этой стратегической группы привлекательны для покупателей с разными вкусами и доходами, т.е. «фирменные магазины производителей» располагают контингентом постоянных покупателей.

Пятая группа – магазины с продукцией класса Премиум – имеет следующие конкурентные преимущества: расположение в центре города; широкий ассортимент продовольственных товаров класса Премиум, а также повседневной продукции; дополнительные услуги по доставке покупок в офис, на дом и т.п.; высокое качество обслуживания покупателей и др.

Этой группе розничных торговых предприятий рекомендуется стратегия фокусирования, основанная на дифференциации продовольственных товаров класса Премиум, которая отличает предлагаемые продукты питания как более качественные, от товаров, предлагаемых конкурентами. В рекомендуемой стратегии идет фокусирование на группе высокодоходных клиентов, так как в ассортимент магазинов входят повседневные продовольственные товары и деликатесные продукты известных мировых производителей. Для удобства обслуживания покупателей используются электронные технологии безналичного расчета.

Универсамы (супермаркеты) (шестая стратегическая группа продовольственных торговых предприятий) предлагают покупателям широкий ассортимент продуктов питания известных производителей, сопутствующий непродовольственный товар по среднерыночным ценам. К конкурентным преимуществам также можно отнести непосредственную близость к покупателю, так как магазины этой группы расположены на всей территории города, обеспечивают дополнительными услугами и предоставляют возможность безналичного расчета при осуществлении покупки, например, ООО «Виктория», ООО «Ника – Плюс», ООО «Русь», ЗАО «Спутник – Ростов», ООО «Эллада», ООО «Пятый элемент» и др. Эта группа одновременно пытается реализовать две стратегии «лидерство в издержках» и «дифференциацию». Результатом становятся средние цены, среднее качество, средняя товарная линейка.

Шестой группе предприятий рекомендуется использовать стратегию фокусирования, основанную на низких издержках, т.е. уровень издержек по подготовке к продаже и реализации продовольственных товаров ниже, чем у конкурентов. Достоинством данной стратегии является то, что предлагаемые продовольственные товары достаточно однородные, и главным фактором является для покупателей цена на товар.

Седьмую группу представляют магазины корпоративных торговых сетей, работающие на территории Ростова-на-Дону. К конкурентным преимуществам данной группы торговых предприятий относятся: охват всех жилых массивов города; большое количество покупателей; широкий ассортимент продовольственных и сопутствующих непродовольственных товаров; наличие дополнительных услуг; предоставление дисконтных карт и т.д.

Корпоративные торговые сети имеют устойчивое финансовое состояние, высокий уровень логистики, а также возможность «диктовать» условия поставщикам продовольственных товаров.

Продовольственные корпоративные сети разделены на подгруппы:

– торговые сети-дискаунтеры: ЗАО «Тандер» («Магнит»), ООО «Росток», «Пятерочка» (ООО «Агроторг-Ростов»), ООО «Империя продуктов»;

– торговые сети, поддерживающие средний уровень цен: ООО «Апекс Плюс», ООО «Солнечный круг», ООО «Ассорти»;

– торговые сети, в ассортимент которых входят продовольственные товары класса Премиум, например, ООО «Перекресток», ООО «О`кей» и т.д.

В условиях жесткой конкуренции, выделенным подгруппам следует рекомендовать конкурентные стратегии каждой в отдельности.

Торговые сети-дискаунтеры в настоящий момент используют стратегию лидерства в издержках, которая объясняется узкой товарной линейкой, наличием продовольственных товаров неизвестных производителей и поставщиков, низкими ценами на предлагаемые продукты питания. Этой подгруппе магазинов рекомендуется стратегия фокусирования на низких издержках, т.е. уровень издержек по подготовке к продаже и реализации продовольственных товаров ниже, чем у двух других подгрупп. Фокусирование сосредоточено в основном на покупателей с низкими доходами. Достоинством данной стратегии является то, что предлагаемые продовольственные товары достаточно однородные, и главным фактором является для покупателей цена на товар.

Торговые сети, поддерживающие средний уровень цен, совмещают две стратегии – «лидерство в издержках» и «дифференциацию», отсюда – средние издержки, средний уровень дифференциации. Исходя из этого, данной подгруппе следует рекомендовать стратегию фокусирования, основанную на дифференциации потребностей покупателей и направленную на оптимизацию ассортимента продовольственных товаров. В данном случае идет фокусирование на покупателей с низкими и средними доходами, предпочитающих качественные продовольственные товары. В период развития торговых сетей этой подгруппы ассортимент был «раздут», и сейчас существует необходимость выведения из ассортимента невостребованных товаров.

Торговые сети, в ассортимент которых входят деликатесы и продовольственные товары класса Премиум, используют стратегию дифференциации товаров, так как обладают широкой линейкой продуктов питания и сопутствующих товаров. Ассортимент продовольственных товаров приближается к элитному (смешанному) уровню у таких магазинов, как «Зеленый перекресток» ООО «Перекресток», что указывает на высокое качество товаров и уникальность предложения. Исходя из этого, данной подгруппе рекомендуется использовать стратегию фокусирования, основанную на дифференциации продовольственных товаров. Стратегия предполагает фокусирование на группе средне- и высокодоходных покупателей, которые могут удовлетворить свои потребности в товарах повседневного спроса и деликатесной продукции.

Ф. Котлер, исходя из доли рынка, принадлежащего предприятию, выделяет четыре типа конкурентных стратегий: стратегии лидера рынка, «бросающего вызов», «следующего за лидером» и специалиста («нишера») [9].

Лидер рынка, как правило, является ориентиром для других компаний в вопросах ценообразования, выпуска новых товаров, выхода на новые территории дистрибуции и интенсивности продвижения.

Чтобы сохранить ведущую позицию, доминирующие компании должны искать пути увеличения общего спроса на рынке; защиты имеющейся доли на рынке посредством оборонительных и наступательных мероприятий; увеличения доли своего присутствия на рынке.

Стратегии новичка рынка или «бросающего вызов». В погоне за увеличением своей доли на рынке новички могут атаковать лидеров и других конкурентов. Стратегической целью большинства претендентов на лидерство является увеличение своей доли на рынке. Агрессор может начать атаковать лидера рынка, компании одного с ним размера, которые не справляются со

своими задачами или испытывают недостаток финансирования, или мелкие местные или региональные компании, которые не справляются со своими задачами или испытывают недостаток финансирования. К наступательным стратегиям относятся: лобовая атака (направлена на сильные стороны конкурента и идет сразу по нескольким направлениям); фланговая атака (через выявление наиболее слабых мест конкурента); окружение (нанесение ударов сразу со всех направлений, так что конкурент вынужден обороняться одновременно с фронта, флангов и тыла; обычно с привлечением ресурсов, превышающих возможности соперника); удар из-за фланга (стратегия маневрирования, при которой компания-претендент обходит конкурента, выбирая в качестве цели более легкие рынки, например, налаживает дистрибуцию на новых территориях или пытается вытеснить существующие товары, предлагая их модификации); технологический скачок (стратегия, характерная для IT-сектора, когда вместо копирования товаров конкурента, компания-претендент кропотливо разрабатывает превосходящие по уровню технологии); партизанские нападения (периодические вылазки, характерные для претендентов, обладающих скромными ресурсами).

Стратегии «ведомого» или «следующего за лидером». Доля ведомого на рынке характеризуется высоким постоянством. Каждый ведомый пытается донести до своего целевого рынка выраженные преимущества и является основным объектом атак претендентов. Поэтому ведомые при низких производственных издержках должны поддерживать высокое качество товара и обслуживания. Характерные стратегии ведомых: клонирование и паразитическое существование за счет лидера; имитация, определенное подражание лидеру с сохранением индивидуально оформленной рекламы, самостоятельного ценообразования и т. д.; приспособленчество, заимствование товаров лидера.

Стратегии «нишевика» или специалиста. Альтернативой ведомого большого рынка является лидерство на маленьком рынке или в нише. Мелкие предприятия обычно избегают конкурентной борьбы с более крупными компаниями и стремятся занять рынки, малоинтересные или совсем неинтересные более крупным предприятиям. Компании, занимающие малую долю рынка внутри небольших ниш, могут быть высокодоходными. В конечном итоге «нишевик» хорошо узнает потребности целевых потребителей и может удовлетворить их лучше конкурентов. Ключевой момент – узкая специализация. «Нишевикам» нужно создавать ниши, расширять и защищать их [8].

Основываясь на классификации конкурентных стратегий Ф. Котлера для предприятий розничной торговли продовольственными товарами, относящихся к стратегическим группам «магазин в шаге от дома», «мономагазины», «магазины с VIP-продукцией», можно предложить стратегию «нишевика» (специалиста). Торговые предприятия этих групп ориентируют свою деятельность на четко выделенный сегмент городского рынка продовольственных товаров. Магазины в шаге от дома – ограниченный территориальный сегмент обслуживания. «Магазины с VIP-продукцией» – сегмент высокодоходной части населения. «Мономагазины» – сегмент ценителей разнообразия определенной группы товаров, т.е. люди, которых не устраивают стандартные товары.

Торговым предприятиям стратегической группы «магазины-дискаунтеры» рекомендуется стратегия «нишевика» в сочетании со стратегией «бросающего вызов».

Магазины-дискаунтеры в первую очередь направляют свою деятельность на определенный сегмент продовольственного рынка. Это, как правило, покупатели таких социальных групп, как пенсионеры, студенты, многодетные семьи и др. В другом случае, благодаря низким ценам на продовольственные товары первой необходимости и удобному расположению, магазины-дискаунтеры привлекают новых покупателей, т.е. атакуют через цену торговые предприятия, доминирующие на рынке.

«Фирменным магазинам производителей» можно рекомендовать стратегию специалиста в сочетании со стратегией «следующего за лидером», что позволяет этим торговым предприятиям сохранить своего покупателя благодаря исчерпывающему ассортименту производителя (от недо-

рогой продукции до деликатесов), высокому качеству продукции, ценовой политике и имиджу предприятия-производителя. Чаще всего производители предлагают в своих магазинах полный ассортимент выпускаемой ими продукции, а в других торговых предприятиях ассортимент производителя ограничен, что привлекает покупателя именно в фирменные магазины. Магазины производителей продовольственных товаров в своей рыночной стратегии концентрируются на получении прибыли и не участвуют в интенсивной конкурентной борьбе.

Для стратегической группы конкурентов «универсамы (супермаркеты)» приемлемы две стратегии: «бросающего вызов» и «следующего за лидером». Магазины этой группы конкурентов располагаются как в центре Ростова-на-Дону, так и в спальных районах, т.е. охватывают большое число потенциальных покупателей. К основным конкурентным действиям предлагаемых стратегий можно отнести расширение ассортимента продукции популярных производителей, сезонные ценовые скидки на некоторые товарные группы продуктов питания (колбасные изделия, молочные продукты, овощи, фрукты), а также проведение интенсивной рекламной кампании магазина.

Корпоративные торговые сети как стратегическая группа конкурентов, предлагая услуги розничной торговли покупателям с разным доходом, занимают доминирующую позицию на городском рынке продовольственных товаров. Сетевые магазины являются универсальными торговыми предприятиями, предоставляющими ассортимент не только продовольственных товаров, но и сопутствующих непродовольственных товаров, а также комплекс дополнительных услуг и др.

Учитывая разделение торговых предприятий этой стратегической группы конкурентов на подгруппы, можно рекомендовать следующие стратегии:

– для торговых сетей-дискаунтеров – стратегия «нишевика» в сочетании со стратегией «бросающего вызов», так как основной контингент покупателей составляют клиенты с низкими доходами, и главным фактором для выбора магазинов данной подгруппы является цена на предлагаемые продовольственные товары;

– для торговых сетей, поддерживающих среднерыночный уровень цен, приемлемы две стратегии «бросающего вызов» и «следующего за лидером»;

– для торговых сетей, в ассортимент которых входят продовольственные товары класса Премиум – стратегия «лидера рынка», так как эти предприятия стремятся к расширению спроса и обнаружению новых покупателей товаров. В ассортимент этих магазинов входят престижные продовольственные товары популярных производителей, что привлекает покупателей, следовательно, главным фактором выбора торговых предприятий этой подгруппы является качество продуктов питания и их разнообразие.

Конкурентные стратегии, рекомендованные предприятиям розничной торговли продовольственными товарами, представлены в табл.2.

Таблица 2

Конкурентные стратегии предприятий сферы
розничной торговли продовольственными товарами

Стратегические группы конкурентов	Конкурентные стратегии	
	На основе конкурентных преимуществ (по М. Портеру)	Основанные на доле рынка предприятия (по Ф. Котлеру)
1	2	3
Магазин в шаге от дома	Стратегия фокусирования, основанная на дифференциации потребностей покупателей и направленная на оптимизацию ассортимента продовольственных товаров.	Стратегии «нишевика» (специалиста).
Мономагазины (узкоспециализированные предприятия)	Стратегия фокусирования, основанная на дифференциации предлагаемых продовольственных товаров и направленная на расширение рыночной ниши.	Стратегии «нишевика» (специалиста).

Окончание табл.2

1	2	3
Магазины-дискаунтеры	Лидерство в издержках.	Стратегии «нишевика» (специалиста) в сочетании со стратегией «бросающего вызов».
Фирменные магазины производителей	Стратегия дифференциации, основанная на достижении высокого уровня разнообразия и уникальности предложения.	Стратегии «нишевика» (специалиста) в сочетании со стратегией «следующего за лидером».
Магазины с VIP-продукцией	Стратегия фокусирования, основанная на дифференциации продовольственных товаров класса Премиум, направленная на достижение высокого уровня разнообразия и уникальности предложения.	Стратегии «нишевика» (специалиста).
Универсамы (супермаркеты)	Стратегия фокусирования, основанная на низких издержках.	Приемлемые стратегии: – «бросающего вызов»; – «следующего за лидером».
Торговые сети: – сети-дискаунтеры; – сети, поддерживающие среднерыночный уровень цен; – сети, в ассортименте которых продовольственная продукция класса Премиум.	Стратегия фокусирования, основанная на низких издержках. Стратегия фокусирования, основанная на дифференциации потребностей покупателей. Стратегия фокусирования, основанная на дифференциации продовольственных товаров класса Премиум.	Стратегия «нишевика» (специалиста) в сочетании со стратегией «бросающего вызов». Приемлемые стратегии: – «бросающего вызов»; – «следующего за лидером». Стратегия «лидер рынка».

Выводы. Конкурентные стратегии, рекомендуемые предприятиям сферы услуг розничной торговли продовольственными товарами, базируются на полученных результатах стратегического сегментирования конкурентов данного рынка. Предлагаемые стратегии позволят не только поднять уровень конкурентоспособности продовольственных торговых предприятий, но и будут способствовать развитию розничной торговли в Ростове-на-Дону.

Библиографический список

1. Фатхутдинов Р.А. Стратегический маркетинг / Р.А. Фатхутдинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2002.
2. Аренков И.А. Стратегический маркетинг в розничной торговле / И.А. Аренков, Т.И. Греков. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2006.
3. Ерохина Л.И. Маркетинг в оптовой и розничной торговле / Л.И. Ерохина, Е.В. Башмачникова. – М.: КНОРУС, 2007.
4. Беттгер Ф. Стратегия успеха в торговле / Ф. Беттгер. – Екатеринбург: ЛИТУР, 2004.
5. Никишкин В.В. Торговый маркетинг / В.В. Никишкин. – М.: Изд-во Рос. экон. акад., 2002.
6. Царёв В.В. Оценка конкурентоспособности предприятий (организаций). Теория и методология / В.В. Царёв, А.А. Канторович, В.В. Черныш. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2008.
7. Портер М. Конкурентная стратегия. Методика анализа отраслей и конкурентов / М. Портер; пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2006.
8. Котлер Ф. Маркетинг. Менеджмент / Ф. Котлер, К.Л. Келлер; пер. с англ. – 12-е изд. – СПб.: Питер, 2007.
9. Ламбер Ж.-Ж. Стратегический маркетинг / Ж.-Ж. Ламбер; пер. с англ. – М.: Инфра–М, 2006.

Материал поступил в редакцию 30.03.2011.

References

1. Fatxutdinov R.A. Strategicheskij marketing / R.A. Fatxutdinov. – 2-e izd., pererab. i dop. – SPb.: Piter, 2002. – In Russian.
2. Arenkov I.A. Strategicheskij marketing v roznichnoj torgovle / I.A. Arenkov, T.I. Grekov. – SPb.: Izd-vo SPbGUE`F, 2006. – In Russian.
3. Eroxina L.I. Marketing v optovoj i roznichnoj torgovle / L.I. Eroxina, E.V. Bashmachnikova. – M.: KNORUS, 2007. – In Russian.
4. Bettger F. Strategiya uspexa v torgovle / F. Bettger. – Ekaterinburg: LITUR, 2004. – In Russian.
5. Nikishkin V.V. Torgovy`j marketing / V.V. Nikishkin. – M.: Izd-vo Ros. e`kon. akad., 2002. – In Russian.
6. Czaryov V.V. Ocenka konkurentosposobnosti predpriyatij (organizacij). Teoriya i metodologiya / V.V. Czaryov, A.A. Kantorovich, V.V. Cherny`sh. – M.: YUNITI-DANA, 2008. – In Russian.
7. Porter M. Konkurentnaya strategiya. Metodika analiza otraslej i konkurentov / M. Porter; per. s angl. – M.: Al`pina Biznes Buks, 2006. – In Russian.
8. Kotler F. Marketing. Menedzhment / F. Kotler, K.L. Keller; per. s angl. – 12-e izd. – SPb.: Piter, 2007. – In Russian.
9. Lamber Zh.-Zh. Strategicheskij marketing / Zh.-Zh. Lamber; per. s angl. – M.: Infra–M, 2006. – In Russian.

DEVELOPMENT OF COMPETITIVE STRATEGIES OF RETAILERS IN FOOD MARKET

O.V. KHLOPENKO
(Don State Technical University)

Advice on the competitive strategies choice by the food retailers subject to their strategic competitive position is provided.
Keywords: *competitive strategy, competitive advantage, strategic groups of competitors, consumer behavior.*

УДК 347.73:334.012.32:005.591.6

КОММЕРЦИАЛИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И СУЩНОСТЬ ИННОВАЦИОННОГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА

Б.М. ГЕТМАН, О.А. НЕНАХОВА, В.А. ЧИСТОВА
(Донской государственный технический университет)

Раскрыты концептуальные основы коммерциализации в условиях рыночной экономики. Дан анализ сущности инновационного предпринимательства в сфере регулирования коммерческой инновационной деятельности. Освещены основные проблемы инновационного предпринимательства.
Ключевые слова: *коммерциализация, инновации, информационные ресурсы, инновационный процесс, интеллектуальная собственность, страхование.*

Введение. Широкое использование информационных технологий в различных сферах жизнедеятельности существенно изменило представление о месте и роли информации в современном обществе. Все отчетливее проявляет себя новая экономическая категория – национальные информационные ресурсы, которые являются существенной частью стратегических ресурсов общества и важным фактором развития постиндустриального мира.

Можно уверенно говорить о том, что национальный, социальный и культурный престиж страны, ее экономическое состояние определяются уровнем накопления и использования национальных информационных ресурсов. Иначе говоря, национальные информационные ресурсы являются общественным информационным богатством страны и вопросы их воспроизводства, накопления и использования можно отнести к задачам общегосударственного значения.

Основные положения. В современных условиях государство во многом берет на себя функцию обеспечения бизнеса одним из важнейших ресурсов инновационного процесса (главной составляющей инновационного предпринимательства) – научными знаниями и идеями. Стимулирование применения инноваций связано с проблемой правильного их выбора. Сложность отбора для внедрения в производство того или иного прилагаемого наукой и техникой решения заключается прежде всего в разнообразии возможного воздействия каждого из этих решений на производство.

Актуальной для инновационного предпринимательства является проблема выбора объекта нововведения, которая состоит в том, что правильный первоначальный выбор предопределяет весь ход последующей инновационной деятельности и делает развитие производства необратимым.

Государственная инновационная политика должна быть направлена на стимулирование создания благоприятного климата для инновационных процессов и должна являться связующим звеном между сферой научно-технической деятельности и производства [1].

В настоящее время в мировом хозяйстве активно формируется новый тип экономического роста. Движущей силой его являются целенаправленно создаваемые государством и национально ориентированным бизнесом системы воспроизводства и использования знаний, воплощение их инноваций – наиболее значимые ресурсы современного хозяйственного развития, а также механизмы их расширенного воспроизводства и капитализации. Уровень и динамика развития передовых технологий, проблемы формирования и регулирования инновационного предпринимательства, правовой статус и защищенность интеллектуального капитала, механизмы его проникновения на глобальные рынки в конце XX столетия стали определяющими характеристиками производственных сил и возможностей, в целом – весьма *актуальной проблемой* современности.

Под инновациями в широком смысле понимается прибыльное (рентабельное) использование новшеств в виде новых технологий, видов продукции и услуг, организационно-технических и социально-экономических решений производственного, финансового, коммерческого, административного или иного характера.

Период от зарождения идеи, создания и распространения новшества и до его использования принято называть жизненным циклом инновации. С учетом последовательности проведения работ жизненный цикл рассматривается как инновационный процесс.

Бесспорно, что сущность инновационной деятельности как экономического явления должны определить экономисты; задача экономической науки в области теории инновации состоит в формировании системы знаний по данному вопросу. Вклад юриспруденции состоит в осмыслении с позиций правоведения тех отношений, которые складываются в сфере инновационной деятельности и подлежат правовому регулированию. Право как юридическая надстройка предопределяется экономическим базисом общества.

Возрождение российской экономики на новом технологическом базисе и в новом организационном качестве должно происходить на основе тщательно продуманной концепции. Сегодня многие политики, экономисты, ученые связывают перспективы экономического развития России с технологической революцией, материальной основой которой являются инновации в сфере экономических отношений. Однако для того чтобы концепция была реалистической, необходимо четко понимать смысл и значение тех явлений, которые составляют основу любой концепции [2].

За последние десять лет российская концепция инноваций прошла в своем развитии путь от идеи, понятной лишь узкому кругу специалистов, до создания всеобщего понимания этого термина. Несмотря на это, нельзя с полной уверенностью утверждать, что смысл этого термина стал понятен всем, кто его употребляет. Для решения многих экономических, социальных и правовых проблем, связанных с использованием и употреблением «инновационной» терминологии, необходимо обстоятельно исследовать сущность и содержание термина «инновация» [3].

Предложить экономико-правовую модель инновационной деятельности, имея в виду цели и задачи правового регулирования, значит:

– создать понятийный аппарат регулирования инновационной деятельности, а именно: сформулировать и закрепить на федеральном законодательном уровне основные понятия, используемые в области инновационных отношений. При этом понятия, используемые в нормативных текстах, должны обладать устойчивым характером, сохраняя свой особый смысл в каждом новом правовом акте. В соответствии с принципами правового регулирования правоотношений, используемая терминология должна всегда трактоваться однозначно и не должна зависеть от контекста или даты принятия нормативного акта [4, 5];

– обозначить место правовых норм, регулирующих инновационную деятельность, в системе российского права и законодательства;

– определить роль и функции государства в регулировании инновационного процесса; обосновать правовую природу участия государства в инновационной деятельности, а также правовых норм, образующих институт государственной системы экономического стимулирования инновационной активности, обеспечении прав, свобод и интересов предпринимателей и их защите.

Одним из базовых элементов национальной инновационной системы является высокоразвитая и эффективная информационная инфраструктура в области науки и технологий, обеспечивающая расширенное воспроизводство и передачу знаний с использованием современных информационных и телекоммуникационных технологий.

Работы по развитию и совершенствованию информационной инфраструктуры научно-инновационной сферы имеют многоплановый комплексный характер и ведутся по следующим основным направлениям:

– совершенствование государственной системы научно-технической информации и ее информационных ресурсов;

– развитие научной компьютерной сети;

– развитие высокопроизводительных вычислительных ресурсов;

– разработка и использование современных информационных технологий.

Рынок инноваций как механизм распространения наукоемкой продукции обладает многими чертами товарного рынка, рынок инноваций вместе с тем имеет свою специфику, которая во многом определяется спецификой предлагаемого товара (инноваций):

– рынок характеризуется огромным разнообразием товаров – инновационных проектов;

– имеет глобальный характер;

– по своей природе это рынок «покупателя», где имеет место значительное преобладание предложения товаров над спросом;

– покупателями инноваций являются профессионалы, а цель покупки заключается в повышении конкурентоспособности фирмы, приобретающей инновации;

– этот рынок вторичен по отношению к товарному рынку, т. е. спрос на инновации определяется спросом на товары (услуги), производимые на основе использования инноваций.

Основным товаром рынка является научный и научно-технический результат – продукт интеллектуальной деятельности, на который распространяются авторские и аналогичные права, оформленные в соответствии с действующими международными, федеральными, корпоративными и другими законодательными и нормативными актами, в том числе частью 4 Гражданского кодекса, вступившего в действие с 01.01.2008 г.

Специфика рынка новшеств заключается в том, что стоимость и цена нововведений на рынке формируются под влиянием экономической результирующей взаимодействия факторов конкретного производства, а не только под влиянием величины совокупного спроса и предложения [6].

Научно-техническая продукция, как рыночная, отличается от обычных товаров тем, что на данный момент она может иметь потребительскую стоимость, т.е. подлежать коммерциализации, а может и не иметь (не быть товаром), но через некоторый период времени способна проявить ее.

Источником инноваций является деятельность творческих специалистов, монопольно владеющих специфическими знаниями и в условиях конкуренции получающих научно-техническую ренту.

Инновационная деятельность – это деятельность по созданию, доведению научно-технических идей, изобретений, разработок до результата, пригодного для практического использования и распространения. Она включает все виды научной деятельности, а также проектно-конструкторские, технологические, опытные работы, деятельность по освоению инноваций и их реализацию, которые осуществляются на различных стадиях жизненного цикла.

Под инновацией в работе понимается конечный результат инновационной деятельности, воплощенный в виде нового или усовершенствованного продукта, внедренного на рынке, нового или усовершенствованного технологического процесса, нового подхода к социальным услугам. Основными свойствами инновации являются научно-техническая новизна и производственная применимость.

Коммерциализация инноваций состоит в соединении разработчика идеи и ее заказчика на стадии опытного производства и массового тиражирования.

Коммерциализация инноваций – совокупность действий от выявления перспектив коммерческого использования нового товара до реализации его на рынке и получения коммерческого эффекта. Коммерциализация инноваций предполагает получение экономического эффекта от реализации научно-технической разработки, находящейся на различной стадии завершения, начиная от идеи и заканчивая производством продукции. Понятие «технология» при этом включает как результаты НИР и ОКР, так и инновационную продукцию.

Коммерциализация результатов научно-технической деятельности представляет собой процесс превращения этих результатов в товар и их эффективную реализацию в промышленных масштабах. В современном российском законодательстве термина «коммерциализация» нет, он

заменен выражением «вовлечение интеллектуальной собственности в хозяйственный оборот». Однако коммерциализация – это важнейший элемент инновационного процесса.

Практика высокоразвитых стран свидетельствует, что существует многообразие механизмов, с помощью которых результаты научных исследований доходят до непосредственных потребителей (заказчиков) – хозяйствующих организаций, и государство играет в этом важнейшую роль. Поэтому следует отметить, что *основная особенность коммерциализации инноваций состоит в том, что государство выступает главным участником-«катализатором» инновационного процесса.* Государство участвует в создании благоприятного инновационного климата и содействует коммерциализации результатов исследовательской деятельности [7, 8].

Процесс инновации и коммерциализации не является линейным. Фактически он проходит как пинбол – движется в одном направлении, пока не встретится препятствие, затем отлетает в другую сторону. Этот беспорядочный процесс продолжается до тех пор, пока цель не будет достигнута. Инновация – это повторяющийся процесс, где изобретатель учится на своих ошибках и основывается на том, что он учит.



Процесс инновации и коммерциализации как категория деятельности

На рисунке представлен процесс инновации и коммерциализации как категории деятельности. Внутри каждой есть много нелинейных, часто хаотических, видов деятельности.

Изобретение и разработка инновации. Процесс изобретения и разработки инновации обычно состоит из четырех видов деятельности: связь, открытие, изобретение и применение. Коротко, связь включает в себя определение отношений, которые могут привести к открытию. Это называется феноменом «Эврика!», который проявляется, когда открывается что-то новое. Из такого открытия получается изобретение, имеющее потенциал для применения во множестве различных контекстов.

Определение возможностей. Изобретение нового устройства или процесс усовершенствования существующего очень важен, но один только этот процесс не создает финансовой возможности. Возможность – это пересечение идеи и рыночной потребности или пространства. Она часто отражается в формулировке бизнес-концепции, определяющей продукцию или процессии и клиента или конечного пользователя технологии, а также преимущества и применения техноло-

гии и стратегию распространения. Эта формулировка концепции обеспечивает основу для проверки осуществимости финансовой возможности на рынке.

Обеспечение защиты интеллектуальной собственности. В начале процесса изобретения и инновации изобретателю нужно найти способы защиты создаваемой им интеллектуальной собственности. Многие изобретатели не могут осознать, как важно юридически защищать их работу, чтобы применить патент или другое право на интеллектуальную собственность в нужное время. Защита интеллектуальной собственности – идей и изобретений – важна для их успешной коммерциализации. Однако важно правильно определить нужный тип защиты интеллектуальной собственности, который будет лучше всего соответствовать целям коммерциализации.

Первое важное решение: нужен ли патент? Первое важное решение, которое нужно принять: обеспечить ли патентную защиту для изобретения или инновации. В этом отношении нужно ответить на вопросы:

– Представляется ли технология технически осуществимой?

– Необходим ли патент для успешной коммерциализации технологии?

Для некоторых технологий получение патента займет больше времени, чем позволяют возможности. Для других – патент обеспечит короткий период спокойствия для вступления на рынок без конкурентов. После принятия решения, патентовать технологию или нет, изобретатель должен также разработать прототип и определить, является ли продукция технически осуществимой.

Разработка продукции, создание опытных образцов и технологическая осуществимость. Каждый новый продукт проходит через конструирование, разработку и создание опытных образцов, в процессе чего проверяется осуществимость технологии. Сегодня начальная разработка, сокращение пути на рынок, раннее изготовление опытных образцов и вычисление дополнительных возможностей являются главными компонентами для эффективного процесса разработки продукции в постоянно меняющейся окружающей среде. Проверка в действии потенциальными пользователями на различных стадиях процесса снизит вероятность ошибки в конечном продукте.

Разработка и проверка концепции бизнеса. Для определения того, является ли изобретение или инновация коммерчески осуществимой, требуется тщательный анализ промышленности, рынка, возможности и недостатков команды основателей и ресурсов, необходимых для того, чтобы начать бизнес. Эта стадия определяет отношение между инновацией и рынком. Исследованием определено, что шансы на коммерческий успех больше, когда технологические и рыночные факторы рассматриваются вместе.

Принятие второго важного решения: лицензировать, продать или производить? У изобретателей есть выбор: они могут лицензировать право производить и продавать свои изобретения существующим компаниям, получая авторские отчисления с каждого проданного экземпляра. Также они могут продать права на технологию другой компании, или сами могут основать компанию для производства и продажи своих изобретений. Это очень трудное решение для исследователей и изобретателей, работающих в университетах, исследовательских институтах, правительственных лабораториях или в больших корпорациях. Решение создать компанию означает для таких изобретателей отказ от занимаемой должности и поиск стартового капитала, что выбивает их из колеи, тогда как лицензирование или продажа авторских прав решает этот вопрос более гибко. Кто владеет технологией, созданной изобретателем, – это вопрос, который также влияет на принятие второго важного решения.

Развитие бизнеса. Когда концепция бизнеса оценена, признана осуществимой и принято решение создать компанию, необходимо разработать инфраструктуру бизнеса. Это обычно сопровождается разработкой подробного бизнес-плана, который регламентирует работу предприятия, его политику, планы маркетинга и роста и полный набор финансовых документов, а также подробный анализ промышленности, рынка и рабочей силы исходя из исследований осуществимости. Разработка бизнеса также включает в себя его юридическую структуру и распределение ответст-

венности акционеров. Если изобретатель или предприниматель ищет внешний капитал, он ведет переговоры с инвесторами. Изобретателю или предпринимателю также нужно провести переговоры со стратегическими партнерами, чтобы обсудить некоторые моменты бизнес-плана [9].

Наука в современном мире стала одним из важнейших инструментов обеспечения поступательного экономического развития. В связи с этим большого значения достигла инновационная деятельность и рынок инноваций, на котором главенствующее место занимает процесс коммерциализации. Поскольку именно он является завершающим этапом инновационного процесса, на котором происходит превращение продукта в товар и его реализация на рынок, то в этом и отражена суть данного процесса, а именно, *коммерциализация инноваций* – это совокупность действий от выявления перспектив коммерческого использования нового товара до реализации его на рынке и получения коммерческого эффекта.

Коммерциализацию инноваций часто называют также трансфертом технологий и коммерциализацией технологий. *Коммерциализация технологий* – это получение выгоды от коммерческого использования информации о технологии или самой технологии.

Деятельность участников коммерциализации, к которым относятся научно-исследовательские институты, ученые, изобретатели, венчурные компании и фонды, инвесторы, торговые предприятия и другие, направлена на *продвижение проектов коммерциализации технологий*, под этим подразумевается «упаковка» технологий и поиск партнеров, финансовых и других ресурсов для продажи технологии в различных формах или создания предприятия для ее совместной эксплуатации. На этой основе было создано большое количество различных программ, центров, фондов, направленных на поддержание и продвижение проектов коммерциализации технологий [10].

В середине XX в. сложилось современное понимание инновационного предпринимательства. Задачей предпринимателей является реформирование способов производства путем внедрения изобретения, а в более общем смысле – через использование новых технологий для производства новых товаров или прежних товаров, но по новым методам, благодаря открытию нового источника сырья или нового рынка готовой продукции – вплоть до реорганизации прежней отрасли промышленности.

Сутью этого определения является признание новаторства и новизны вообще как неотъемлемой черты предпринимательства. Действительно, поиск новых идей и их реализация – это одна из самых сложных задач предпринимателя. Здесь требуется не только умение творчески мыслить и находить новые решения, но и понимать расклад сил, действующих в сложившейся обстановке [11].

Под инновационным предпринимательством понимается процесс создания и коммерческого использования технико-технологических нововведений. Как правило, в основе предпринимательской деятельности лежит нововведение в области продукции или услуг, позволяющее создать новый рынок, удовлетворить новые потребности. Инновации служат специфическим инструментом предпринимательства, причем не инновации сами по себе, а направленный организационный поиск новшеств, постоянная нацеленность на них предпринимательских структур.

Инновационное предпринимательство – это особый новаторский процесс создания чего-то нового, процесс хозяйствования, в основе которого лежит постоянный поиск новых идей. Оно связано с готовностью предпринимателя брать на себя весь риск по осуществлению нового проекта или улучшению существующего, а также возникающую при этом финансовую, моральную и социальную ответственность [12].

В общем плане инновационное предпринимательство можно определить как общественный технический экономический процесс, приводящий к созданию лучших по своим свойствам товаров (продукции, услуг) и технологий путем практического использования нововведений.

Выделяют три основных вида инновационного предпринимательства:

– инновация продукции;

– инновация технологии;

– социальные инновации.

Первый вид инновационного предпринимательства – *инновация продукции* – представляет собой процесс обновления сбытового потенциала предприятия, обеспечивающий выживаемость фирмы, увеличение объема получаемой прибыли, расширение доли на рынке, сохранение клиентуры, укрепление независимого положения, повышение престижа, создание новых рабочих мест и т.д.

Второй вид **–** *инновация технологии* – это процесс обновления производственного потенциала, направленный на повышение производительности труда и экономию энергии, сырья и других ресурсов, что, в свою очередь, дает возможность увеличить объем прибыли фирмы, усовершенствовать технику безопасности, провести мероприятия по защите окружающей среды, эффективно использовать внутрифирменные информационные системы.

Последний вид инновационного предпринимательства – *социальные инновации* – представляет собой общий процесс планомерного улучшения гуманитарной сферы предприятия. Применение инноваций такого рода расширяет возможности на рынке рабочей силы, мобилизует персонал предприятия на достижение поставленных целей, укрепляет доверие к социальным обязательствам предприятия перед сотрудниками и обществом в целом.

Инновационная деятельность в большей степени, чем другие направления предпринимательской деятельности, сопряжена с риском, так как полная гарантия благополучного результата в инновационном предпринимательстве практически отсутствует. В крупных организациях этот риск, однако, значительно меньше, поскольку перекрывается масштабами обычной хозяйственной деятельности (отлаженной и чаще всего диверсифицированной).

Об уровне риска инновационной деятельности свидетельствует тот факт, что в среднем из каждых десяти венчурных фирм успеха добиваются лишь одна-две. Высокий риск, как правило, сопровождается и высокой его компенсацией: возможная норма прибыли от внедрения инновационных проектов выше обычной, получаемой при осуществлении других видов предпринимательской деятельности. Именно это и позволяет инновационной сфере существовать и развиваться. Риск инновационной деятельности тем выше, чем более локализован инновационный проект; если же таких проектов много и они в отраслевом плане рассредоточены, то, согласно закону больших чисел, риск минимизируется, и вероятность успеха инновационного предпринимательства возрастает. При этом прибыль от реализации успешных инновационных проектов настолько велика, что перекрывает затраты по всем остальным неудавшимся разработкам.

В общем виде риск в инновационном предпринимательстве можно определить как вероятность потерь, возникающих при вложении предпринимательской фирмой средств в производство новых товаров и услуг, в разработку новой техники и технологий, которые, возможно, не найдут ожидаемого спроса на рынке, а также при вложении средств в разработку управленческих инноваций, которые не принесут ожидаемого эффекта.

Избежать полностью риска в инновационном предпринимательстве невозможно, поскольку инновации и риск – две взаимосвязанные категории. Нововведенческая деятельность обладает высокой степенью неопределенности. Очень трудно предвидеть, какое нововведение будет иметь успех на рынке, а какое не будет пользоваться спросом. Поэтому инновационным предприятиям, в первую очередь, следует тщательно анализировать инновационные проекты для того, чтобы избежать возможных ошибок на самой ранней стадии – стадии отбора проектов.

Одним из способов снижения инновационного риска является диверсификация инновационной предпринимательской деятельности, состоящая в распределении усилий разработчиков (исследователей) и капиталовложений для осуществления разнообразных инновационных проектов, непосредственно не связанных друг с другом.

Важнейшим методом снижения рисков инновационной деятельности является их страхование. Страхование – система экономических отношений, включающая образование специального

фонда средств (страхового фонда) и его использование (распределение и перераспределение) для преодоления и возмещения разного рода потерь и ущерба, вызванных неблагоприятными событиями (страховыми случаями) путем выплаты страхового возмещения и страховых сумм. В страховании обязательно наличие двух сторон: специальной организации, ведающей созданием и использованием соответствующего фонда, – страховщика – и юридических и физических лиц, вносящих в фонд установленные платежи, – страхователей – взаимные обязательства которых регламентируются договором страхования в соответствии с условиями страхования. Из всех форм передачи риска страхование наиболее полно отвечает идеальным условиям, предъявляемым к трансферту риска, так как ресурсы для покрытия потерь инновационных в некоторых случаях являются наиболее эффективной возможностью избежать негативные последствия или снижение уровня риска инновационной деятельности. Применяются следующие прямые управленческие воздействия на возможные управляемые факторы риска:

– анализ и оценка инновационного риска;
– проверка предлагаемых партнеров по инновационному проекту;
– планирование и прогнозирование инновационной деятельности;
– подбор персонала, участвующего в осуществлении инновационной деятельности и др.

Важнейшим фактором снижения риска является *планирование* и *прогнозирование* инновационной деятельности предпринимательской фирмы. Эффективное прогнозирование и планирование дают возможность предпринимателю предвидеть и приспособиться к экономическим колебаниям или изменениям конъюнктуры рынка, снизив, таким образом, уровень риска. Любая предпринимательская структура более устойчива, когда внутренний порядок позволяет ей сопротивляться внешним негативным воздействием.

Одним из внутренних источников снижения предпринимательского риска является *тщательный подбор работников (персонала) фирмы.* Чем больше людей работает в предпринимательской фирме, тем больше риск от принятого каждым из них решения, поэтому руководителю организации следует постоянно уделять внимание кадровым вопросам.

Заключение. На сегодняшний день тема коммерциализации в научно-информационной сфере является очень актуальной. В современном мире наука стала одним из важнейших инструментов обеспечения поступательного экономического развития. Это объясняется двумя основными обстоятельствами. Во-первых, способность генерировать и внедрять достижения научно-технического прогресса превращается в один из факторов обеспечения конкурентоспособности как национальной экономики в целом в глобальной конкурентной среде, так и отдельных товаропроизводителей на конкретных рынках. Во-вторых, в настоящее время наука сама по себе превратилась в специфическую сферу товарного производства, которая производит дорогостоящий товар – объекты интеллектуальной собственности.

Библиографический список

1. Основные направления политики Российской Федерации в области развития инновационной системы на период до 2010 года / Правительство Российской Федерации. – М., 2005.

2. Национальная инновационная система и государственная инновационная политика Российской Федерации. Базовый доклад к обзору ОЭСР национальной инновационной системы Российской Федерации / Министерство образования и науки РФ. – М., 2009.

3. Васин В.А. Концепция национальной инновационной системы и ее практические применения / В.А. Васин, Л.Э. Миндели // Инновации. – 2009. – №1. – С.52.

4. Попова Е.В. О концепции Федерального Закона «О государственной поддержке инновационной деятельности в Российской Федерации» / Е.В. Попова // Инновации. – 2010. – №2. – С.3.

5. Заглумина Н.А. Управление инновационными процессами на предприятии на основе оценки совокупного инновационного потенциала / Н.А. Заглумина // Инновации. – 2010. – №2. – С.109.

6. Киселёв В.Н. Сравнительный анализ инновационной активности субъектов Российской Федерации / В.Н. Киселёв // Инновации. – 2010. – №4. – С.44.

7. Иванов С.Б. Актуальные меры государственной политики по совершенствованию национальной инновационной системы / С.Б. Иванов // Инновации. – 2010. – №5. – С.2.

8. Волынкина М.В. Правовая модель регулирования инновационных отношений / М.В. Волынкина // Инновации. – 2010. – №6. – С.43.

9. Черешнев В.А. Институциональные и организационно-правовые условия формирования инновационной среды для модернизации экономики / В.А. Черешнев // Инновации. – 2010. – №5. – С.37.

10. Румянцев А.А. О роли стратегических инноваций в технологическом подъеме экономики / А.А. Румянцев // Инновации. – 2010. – №4. – С.40.

11. Попова Е.В. Главная цель инновационного законодательства – стимулирование внедрения научных разработок в производство / Е.В. Попова // Инновации. – 2010. – №5. – С.45.

12. Шаров А.В. Развитие малого и среднего инновационного предпринимательства – необходимое условие модернизации экономики России / А.В. Шаров // Инновации. – 2010. – №5. – С.21.

Материал поступил в редакцию 24.03.2011.

References

1. Osnovny`e napravleniya politiki Rossijskoj Federacii v oblasti razvitiya innovacionnoj sistemy` na period do 2010 goda / Pravitel`stvo Rossijskoj Federacii. – M., 2005. – In Russian.

2. Nacional`naya innovacionnaya sistema i gosudarstvennaya innovacionnaya politika Rossijskoj Federacii. Bazovy`j doklad k obzoru OE`SR nacional`noj innovacionnoj sistemy` Rossijskoj Federacii / Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF. – M., 2009. – In Russian.

3. Vasin V.A. Koncepciya nacional`noj innovacionnoj sistemy` i eyo prakticheskie primeneniya / V.A. Vasin, L.E`. Mindeli // Innovacii. – 2009. – #1. – S.52. – In Russian.

4. Popova E.V. O koncepcii Federal`nogo Zakona «O gosudarstvennoj podderzhke innovacionnoj deyatel`nosti v Rossijskoj Federacii» / E.V. Popova // Innovacii. – 2010. – #2. – S.3. – In Russian.

5. Zaglumina N.A. Upravlenie innovacionny`mi processami na predpriyatii na osnove ocenki sovokupnogo innovacionnogo potenciala / N.A. Zaglumina // Innovacii. – 2010. – #2. – S.109. – In Russian.

6. Kiselyov V.N. Sravnitel`ny`j analiz innovacionnoj aktivnosti sub``ektov Rossijskoj Federacii / V.N. Kiselyov // Innovacii. – 2010. – #4. – S.44. – In Russian.

7. Ivanov S.B. Aktual`ny`e mery` gosudarstvennoj politiki po sovershenstvovaniyu nacional`noj innovacionnoj sistemy` / S.B. Ivanov // Innovacii. – 2010. – #5. – S.2. – In Russian.

8. Voly`nkina M.V. Pravovaya model` regulirovaniya innovacionny`x otnoshenij / M.V. Voly`nkina // Innovacii. – 2010. – #6. – S.43. – In Russian.

9. Chereshnev V.A. Institucional`ny`e i organizacionno-pravovy`e usloviya formirovaniya innovacionnoj sredy` dlya modernizacii e`konomiki / V.A. Chereshnev // Innovacii. – 2010. – #5. – S.37. – In Russian.

10. Rumyancev A.A. O roli strategicheskix innovacij v texnologicheskom pod``yome e`konomiki / A.A. Rumyancev // Innovacii. – 2010. – #4. – S.40. – In Russian.

11. Popova E.V. Glavnaya cel` innovacionnogo zakonodatel`stva – stimulirovanie vnedreniya nauchny`x razrabotok v proizvodstvo / E.V. Popova // Innovacii. – 2010. – #5. – S.45. – In Russian.

12. Sharov A.V. Razvitie malogo i srednego innovacionnogo predprinimatel`stva – neobxodimoe uslovie modernizacii e`konomiki Rossii / A.V. Sharov // Innovacii. – 2010. – #5. – S.21. – In Russian.

COMMERCIALIZATION OF INNOVATIVE ACTIVITIES AND ESSENCE OF INNOVATIVE ENTREPRENEURSHIP

B.M. GETMAN, O.A. NENAKHOVA, V.A. CHISTOVA
(Don State Technical University)

The conceptual framework of commercialization in the market system is revealed. The essence of the innovation business in the regulation of the commercial innovative activities is analyzed. The main problems of the innovative entrepreneurship are observed.
Keywords: *commercialization, innovations, information resources, innovative process, intellectual property, insurance.*

УДК 339.138

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ КАК ИНСТРУМЕНТ УСИЛЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ БРЕНДОВ МАССОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ НА РАЗВИТЫХ НАСЫЩЕННЫХ РЫНКАХ

С.Г. ДОБРЫДНЕВА
(Ростовский государственный экономический университет «РИНХ»)

Опробована методика интеграции клиентоориентированной стратегии CRM в привычные маркетинговые инструменты управления лояльностью потребителя. Получен стойкий положительный эффект, способствующий клиентоориентированности бренда и позволяющий решать стратегические задачи, стоящие перед производителем.
Ключевые слова: *CRM, лояльность потребителей, потребительские товары, повседневный спрос, конкурентоспособность, насыщенные рынки.*

Введение. Современное состояние товарного рынка характеризуется избыточностью предложения по огромному ряду товаров и услуг. Это означает, что дефицит товаров как экономическая реалия практически изжил себя: дефицита тем меньше, чем более сегментированный участок рынка рассматривается. То есть если на рынке в целом за счет существования каких-то высокотехнологичных секторов, использующих объективно редкие компоненты, дефицит может иметь место и оказывать влияние на поведение поставщиков, то на рынке потребительских товаров и на рынке товаров повседневного спроса (рынке FMCG) дефицит как явление исчерпан. Это предопределяет ситуацию снижения эффективности привычных инструментов продаж в сформировавшихся экономических условиях. В целях преодоления указанной ситуации упомянутые инструменты должны быть логически актуализированы, адаптированы под современные реалии институциональной среды. Более того, в условиях высококонкурентных рынков, к числу которых бесспорно принадлежит рынок товаров повседневного спроса, имеющийся инструментарий должен быть существенно расширен за счет разработки новых механизмов и техники влияния на покупательское решение [1].

В связи с перечисленными утверждениями, практический маркетинг заинтересован в эффективных исследовательских разработках, востребованных на современном этапе развития торговли.

Несмотря на кажущееся противоречие между клиентоориентированностью и массовостью рынка товаров повседневного спроса, есть все основания исходить из того, что современные технологии сбора и обработки данных позволяют персонифицировать самого массового потребителя.

При реализации клиентоориентированных стратегий в маркетинге владельцы и/или продавцы брендов FMCG осознали важность и необходимость непосредственных взаимоотношений с потребителями так же, как если бы они были продавцами нишевого товара. Весь современный опыт является свидетельством того, что для достижения долгосрочной эффективности бизнеса необходимо формировать прочные взаимоотношения бренда с конечными потребителями и партнерами, базирующиеся не только на конкурентоспособном с точки зрения цены/ассортимента предложении, но и на построении четкой системы ценностей в сознании потребителя [2].

CRM (Customers Relationship Management) как система управления взаимоотношениями с клиентами/потребителями. Эта система широко используется транснациональными корпорациями, реализующими клиентоориентированные стратегии, нацеленные на персонализацию своих каналов коммуникации с клиентами, потребителями и партнерами. Система управления взаимоотношениями с клиентами/потребителями нацелена на достижение цели – знать партнера по коммуникации так, чтобы создать исключительно благожелательную атмосферу взаимодействия и сформировать таким образом желание максимально разумное количество раз повторить

этот опыт взаимодействия, который приводит к обоюдному удовлетворению сторон. Развитие форм управления взаимоотношением с клиентами/потребителями, инициированное требованиями рынка, совпало с развитием многих сопутствующих явлений, что привело к необходимости автоматизации самого процесса управления, т.е. системы CRM. То количество информации о клиентах/потребителях/партнерах, которое позволяет выделять последних и строить отношения с ними так, как этого не делает никто другой, все время растет. Поэтому повышение эффективности системы в целом обусловлено необходимостью разработки соответствующего программного продукта [3].

Ограничивая предметный круг применения CRM сферой деятельности создателей брендов FMCG, также важно довести понятие «управление взаимоотношениями с клиентами/потребителями» до эмоциональной сферы этих взаимоотношений, а именно – управление лояльностью.

При управлении лояльностью формирование и продвижение брендов должно учитывать фактор насыщенности рынка товаров и услуг, и потому деятельность в этом направлении должна концентрироваться на желаниях потребителей и реализации их эмоциональных устремлений. Коммуникативный канал должен не ограничиваться привычными рекламными каналами, а включать потребителя в непосредственный контакт. Поэтому, если компания – производитель бренда FMCG – в рамках выбранной клиентоориентированной маркетинговой стратегии применяет CRM как систему управления взаимоотношениями с клиентами/потребителями, то автоматизация части технологических действий данного процесса, а именно – формирование эффективного коммуникационного канала с потребителями, просто необходима, поскольку без ИТ-составляющей проблему обработки объемных баз данных не решить [4].

Итак, обозначив, что CRM как система управления проактивными взаимоотношениями с потребителями – это одна из самых эффективных управленческих технологий работы с потребителями в условиях повышенной конкуренции развитых насыщенных рынков, рассмотрим ее применение при управлении лояльностью потребителя.

Лояльность возникает в тот момент, когда бренд становится для потребителя чем-то большим, чем набор функциональных характеристик, когда возникает эмоциональная связь, основанная на разделяемых всеми человеческих ценностях, которые в сознании потребителя начинают ассоциироваться с брендом [5].

Этапы создания успешной программы лояльности. Традиционно первым этапом является формирование целей и задач программы. Важнейшая цель совпадает с главной коммерческой целью компании – максимизация прибыли, остальные – удержание имеющихся потребителей, привлечение новых и прочие – вытекают из нее.

Вторым этапом в формировании программы лояльности является создание системы привилегий. Поскольку сама программа не предполагает материальных выгод, то наиболее эффективно она работает на сбалансированном сочетании материальных (стимулирующие, рациональные CRM-механики) и нематериальных (креативные, эмоциональные CRM-механики) привилегий с преобладанием последних. Так, например, нематериальными привилегиями являются эмоциональные выгоды (подчеркнуто особое отношение, персональное обращение и пр.) Рациональными выгодами могут быть бонусные баллы, специальные CRM-призы и т.д.

Далее необходимо создать финансовую концепцию программы.

И, наконец, необходимо решить, как будет проходить реализация программы лояльности, т.е. собственными силами или с помощью привлеченных специалистов. Это зависит от различных факторов, но оба варианта могут быть одинаково успешными [6].

Программа лояльности – идеальный инструмент для сбора необходимых данных о ваших потребителях в нужном объеме.

Для создания лояльности к данному бренду необходимо преодолеть имеющиеся стереотипы потребления, а взамен создать новые, но связанные с данным продуктом. Следующим шагом становится поддержка потребительского выбора, его одобрение и побуждение к сохранению

имевшейся мотивации выбора. И этот этап управления лояльностью требует создания новых технологий взаимодействия с потребителем, так как в условиях насыщенного и перенасыщенного рынка повышается порог чувствительности потребителя к традиционным рекламным и промоактивным методикам и техники воздействия на его покупательское решение [7].

Исследования эффективности применяемых методик привели к выводу, что тактика так называемого «подкупа потребителя» носит разовый характер и оказывает ультрамгновенное воздействие, в то время как целью современного маркетинга должно быть достижение долгосрочного устойчивого положительного эффекта, что, не отменяя необходимости решения тактических задач, переносит управление лояльностью в стратегический аспект. При управлении взаимоотношениями задачи формирования имиджа бренда, выстраивания отношений с потребителем и последующей поддержки имиджа бренда перерастают в стратегические. CRM работает на вовлечение покупателей во взаимодействие с продуктом путем организации постоянного присутствия продукта в информационном пространстве потребителя [8]. Последняя цель достигается созданием персонального коммуникационного канала NewsLetter. Наличие подобного канала дает возможность продвигающим бренды FMCG напрямую информировать потребителя о различных акциях, конкурсах, новостях бренда, об изменении качества продукта, оказывать потребителям знаки внимания (поздравлять с праздниками, в том числе очень личными – днем рождения, годовщиной свадьбы, приглашать на какие-либо мероприятия и пр.). Расширение присутствия бренда в информационном пространстве потребителя – это самый распространенный способ реализации стратегии управления взаимоотношениями с клиентом/потребителем. Адаптация инструментария, сопровождающего избранную стратегию управления взаимоотношениями с потребителем, в имеющиеся привычные маркетинговые инструменты также в состоянии создать позитивный эффект. Рассмотрим пример интегрирования CRM-инструментария в накопительные программы лояльности (интерактивные акции с механикой регистрации кодов). С одной стороны, подобная интеграция расширяет CRM-аналитику:

– данные об участнике (пол, возраст, город/регион, акция/продукт);

– данные по каналам регистраций (смс, web);

– по регистрациям покупок (активация 1, 2 и более 3 кодов);

– анализ действий, типов механик, внесение корректировок.

С другой – позволяет использовать в процессе акции CRM-механики:

– информирование о розыгрышах и призах, например: «розыгрыш призов состоится Х числа, регистрируй коды и увеличь шансы на выигрыш»;

– предоставление дополнительных баллов (иных промо-бонусов) для поддержания интереса к акции и продукту, например: «зарегистрируй еще два кода и станешь претендентом на получение специального приза».

Сегментация полученных и пополняемых баз данных проводится на основе анализа характеристик потребителей. Сегментация может реализовываться с учетом небольшого количества факторов или в расширенном формате с использованием большего числа качественных характеристик. В первом случае достаточно регистрации геодемографических характеристик (пол, возраст, город/регион), во втором – можно учитывать психографические характеристики, если важен учет таких факторов, как образование, стиль жизни, или специфические характеристики самой программы [9].

Классификация потребителей дает возможность предложить более индивидуализированные, совпадающие с их ценностями, привилегии и выгоды, сделать более правильный выбор, минимизировать возможность ошибки, повысить эффективность программы.

Таким образом, интеграция CRM в программы лояльности позволяет производителям и, в частности, маркетологам достичь следующих целей:

– вовлечь потребителя в коммуникацию, воспринимаемую им как диалог, что расширяет возможности получения информации;

– качественно обработать обновляемую информацию (база данных);

– создать и сообщить предложение, максимально ориентированное на потребности конкретного потребителя;

– выяснить реакцию потребителя на сообщенное предложение и скорректировать информацию в базе данных.

Типовая структура интеграции CRM-инструментария в накопительную программу лояльности бренда FMCG рассмотрена на примере стимулирующих акций для сигаретного бренда «21 ВЕК».

Поскольку типовая механика программ лояльности продуктов FMCG основана на накоплении кодов, расположенных на упаковке продукта, то такие программы, как правило, реализуются через web-платформу (сайт) и длятся около 6 месяцев. За накопленные коды участники могут «выкупать» гарантированные призы или направлять эти коды на участие в розыгрышах различных уровней призов. Однако недостатком подобной механики является то, что участники, достигнув интересующих их гарантированных призов, обычно теряют интерес к программе [10].

Внедрение CRM-инструментария в такие программы позволяет поддерживать перманентный интерес уже вовлеченных участников, наряду с сохранением возможности привлекать новых с помощью внедрения различных дополнительных механизмов и рациональных и эмоциональных стимуляторов (CRM-призы). Таким образом, цель внедрения CRM – удержать потребителя в стадии активного потребления (1 код – покупка 1 единицы продукта).

Типовой календарь для стандартной программы без CRM приведен на рис.1.

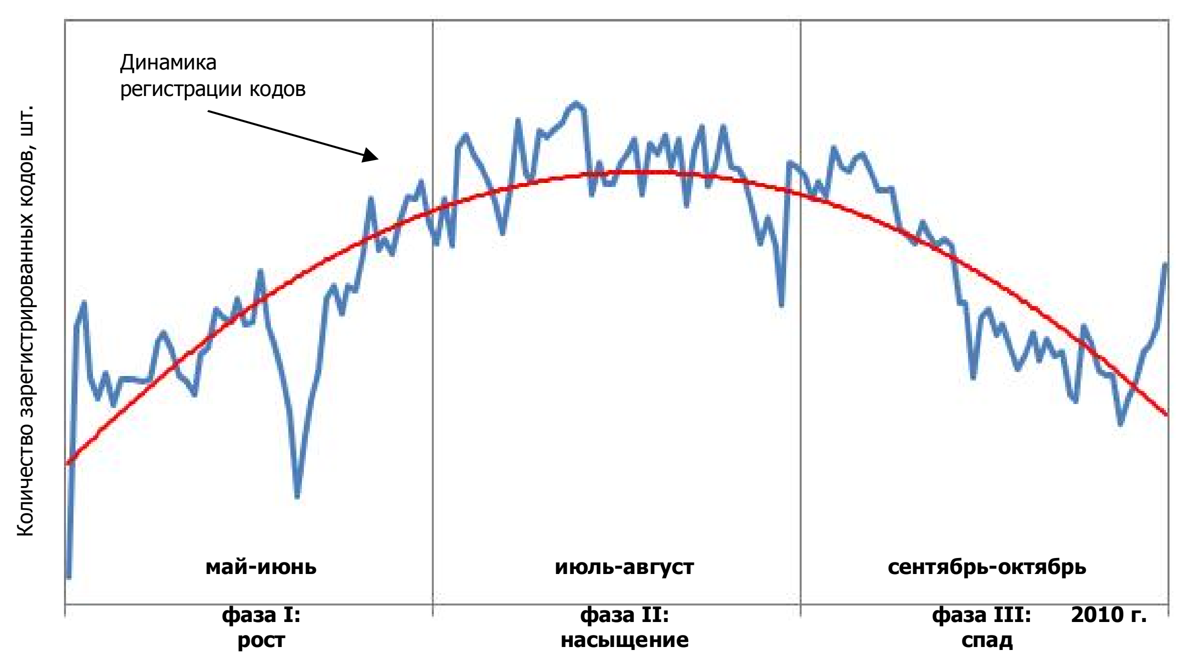


Рис.1. Календарь стандартной программы без CRM

График динамики регистрации кодов стандартной программы лояльности без внедрения CRM представляет собой параболу. В 1-й фазе программы происходит активная регистрация кодов, во 2-й фазе – фиксирование объемов регистрации кодов и их удержание на определенный период, а в завершающей фазе – снижение интереса к программе/продукту и резкое снижение количества регистрируемых кодов.

Очень важно отметить, что динамика активности регистрации кодов как фазовой активности в стандартном течении акции переживает такие же перепады, как динамика продаж. Этот показатель отражен графическими средствами на рис.2.

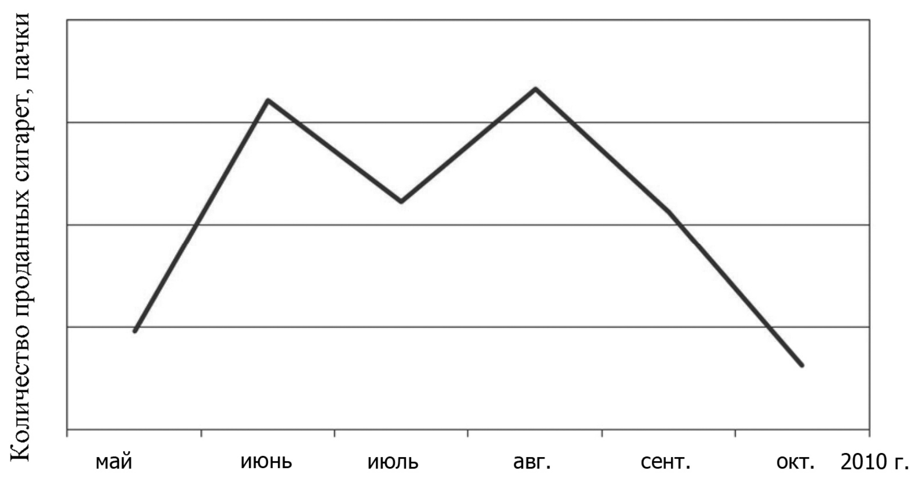


Рис.2. Динамика продаж

Задача внедрения CRM в программу – предотвращение спада регистрации кодов и, как следствие, поддержка уровня продаж выше среднего.

На рис.3 представлены достигнутые в динамике регистрации кодов изменения, обусловленные интеграций в программу CRM-инструментария.

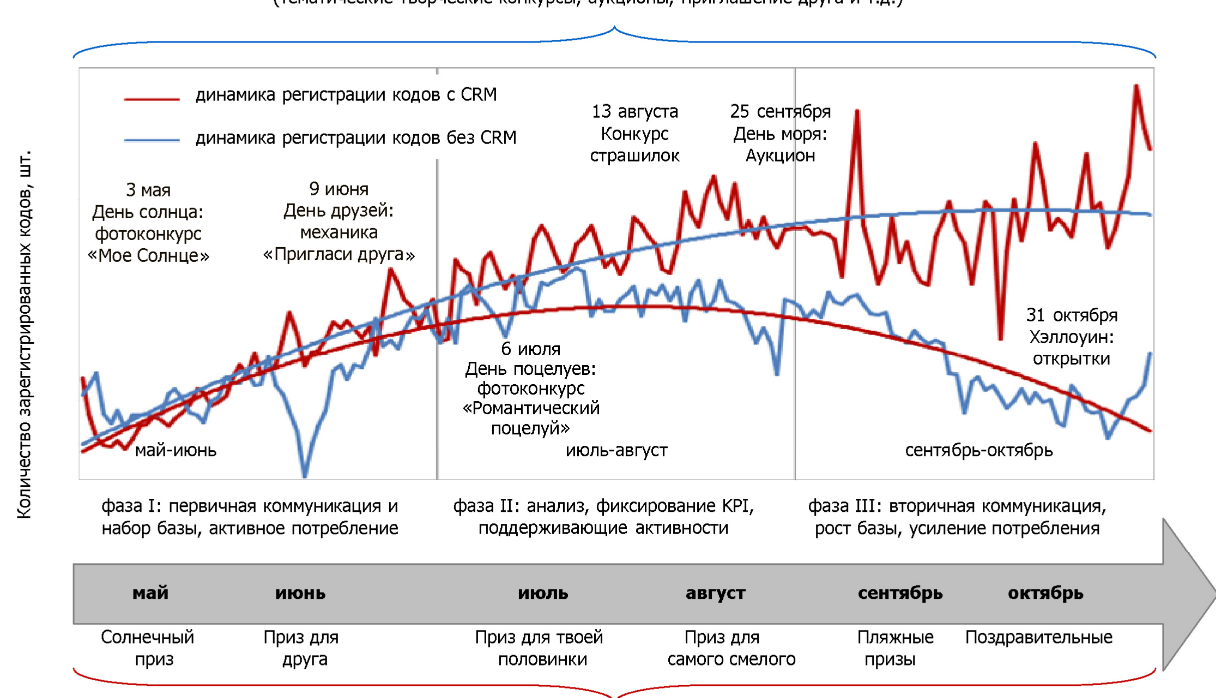


Рис.3. Календарь стандартной программы
с интеграцией CRM-инструментария[1]

---

[1] В качестве CRM механизмов применялись тематические творческие конкурсы, аукционы, приглашение друга и т.д.

Поскольку между динамикой регистрации кодов и динамикой продаж в период проведения акции есть зависимость, то можно утверждать, что цели стимулирования продаж были достигнуты.

При внедрении CRM коммуникация с потребителем происходит на постоянной основе, что не позволяет ему забывать о продукте. Для перевода/сохранения потребителя в стадию регулярного потребления последовательно применяется набор механизмов, мотиваторов. Параллельно потребитель получает общие рассылки (NewsLetter).

Эффективность CRM оценивается следующими основными показателями KPI (Key Performance Indicator):

- исходный: количество активированных кодов;
- базовые:
  - средняя частота введения кодов одним участником;
  - средняя частота введения кодов в сегменте лояльных участников (2+ кодов);
  - количество участников программы;
- структура базы/потребления (оценочно):
  - 0 кодов (зарегистрировались, но не активировали), %;
  - 1 код (зарегистрировались, активировали 1 код), %;
  - 2+ (зарегистрировались, активировали 2+ кодов), %;
- Web-сайт:
  - среднее время на сайте, мин.;
  - количество просмотров страниц;
  - возврат на сайт, %;
- коммуникации (E-mail open rate, %);
- эффективность CRM-механики:
  - вовлекающие: процент участвующих в зависимости от механики;
  - активаторы/бустеры: процент участвующих в зависимости от механики.

Для качественного расчета эффективности CRM оценку показателей KPI следует проводить в сравнении с такими же показателями прошлых программ без CRM.

Для сигаретного бренда «21 ВЕК» такие расчеты приведены в таблице. В целях развития указанного бренда на протяжении нескольких лет проводились типичные интерактивные программы лояльности. В 2010 г. в программу был внедрен CRM-инструментарий.

Сравнительные показатели эффективности

Наименование показателя KPI	Расчетные значения показателя KPI*
Всего зарегистрировано кодов за период акции, шт.	2 460 565
в том числе через CRM-механизмы вовлечения, шт.	215 243
Увеличение кодов за период акции 2010 г. по отношению к акции 2009 г., шт.	845 708
Увеличение кодов за период акции 2010 г. по отношению к 2009 г.	52%
Среднее увеличение кодов на человека за период акции 2010 г., шт.	27,4
Увеличение среднего количества кодов на человека за период акции 2010 г. по отношению к 2009 г.	52%
Общее количество «подаренных» бонусных кодов, шт.	165 294
Стоимость получения 1 бонусного кода, % от стоимости получения 1 зарегистрированного кода	20%
Стоимость получения 1 зарегистрированного кода через CRM, долл.	0,18
Стоимость 1 лояльного потребителя (>1 кода) через CRM , долл.	3,83
Стоимость получения 1 нового потребителя (с «0» до «1+» кодов), долл.	6,78
Общая стоимость CRM на 1 потребителя	1,71

* Количественные показатели взяты условно, реальны только относительные данные.

Для примера, стоимость контакта с потребителем через BTL[2] – 50 руб. без гарантии повторной покупки и переключения.

Выводы. Обобщая результаты исследования, можно утверждать, что применение клиентоориентированных маркетинговых стратегий становится практической необходимостью для производителей FMCG, представляющих свои бренды на товарном рынке.

Проведенные исследования, направленные на выявление ресурсов CRM в реализации клиентоориентированных маркетинговых стратегий, подтверждают выводы об эффективности CRM.

Поскольку рынок FMCG относится к числу самых массовых, то сбор и обработка данных для анализа рынка представляют определенную трудность, преодолеваемую с помощью эффективной автоматизации.

Библиографический список

1. Васин Ю.В. Эффективные программы лояльности. Как привлечь и удержать клиентов/ Ю.В. Васин, Л.Г. Лаврентьев, А.В. Самсонов. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 152 с.

2. Морина М. Бренд как условие лояльности / М. Морина // Тез. докл. на конф. «Повышение лояльности клиентов», 15 марта 2005 г., Москва.

3. Цысарь А.В. Лояльность покупателей: основные определения, методы измерения, способы управления/ А.В. Цысарь // Маркетинг и маркетинговые исследования. – 2002. – №5. – С.57.

4. Малькова И.В. Лояльность потребителей как конкурентное преимущество компании/ И.В. Малькова // Вестн. Моск. ун-та. Серия 21: Управление (государство и общество). – 2008. – №3. – 140 с.

5. Гембл П. Маркетинг взаимоотношений с потребителями/ П. Гембл, М. Стоун, Н. Вудкок. – М.: Изд-во Торговый дом «Гранд», 2002. – 512 с.

6. Капферер Жан-Ноэль. Бренд навсегда: создание, развитие, поддержка ценности бренда/ Жан-Ноэль Капферер. – М.: Вершина, 2007. – 448 с.

7. Андреев А.Г. Лояльный потребитель – основа долгосрочного конкурентного преимущества компании/ А.Г. Андреев // Маркетинг и маркетинговые исследования. – 2003. – №2. – С.16.

8. Аакер Д.А. Создание сильных брендов/ Д.А. Аакер. – М: Издательский дом Гребенникова, 2003. – 440 с.

9. Сайт компании «ЛАЙНСЕРВИС» [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.ls-crm.ru/ru/info/.

10. Сайт AdMe-Сибирь. Специализированный Интернет-ресурс в области рекламы, маркетинга и PR Сибири / И. Шищенко. – Маркетинг – программы лояльности [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://sib.adme.ru/peshehod/marketing-programmy-loyalnosti-petrapromo-7199/#comment_list

Материал поступил в редакцию 06.05.2011.

References

1. Vasin Yu.V. E`ffektivny`e programmy` loyal`nosti. Kak privlech` i uderzhat` klientov / Yu.V. Vasin, L.G. Lavrent`ev, A.V. Samsonov. – M.: Al`pina Biznes Buks, 2005. – 152 s. – In Russian.

2. Morina M. Brend kak uslovie loyal`nosti / M. Morina // Tez. dokl. na konf. «Povy`shenie loyal`nosti klientov», 15 marta 2005 g., Moskva. – In Russian.

[2] В данном случае имеются в виду BTL – акции, в которых происходит прямой контакт с потребителем в местах совершения покупки. BTL-акции (below the line) – инструмент стимулирования продаж, разновидность рекламных акций, где рекламное воздействие производится на потребителя непосредственно в месте принятия решения о покупке.

3. Cy`sar` A.V. Loyal`nost` pokupatelej: osnovny`e opredeleniya, metody` izmereniya, sposoby` upravleniya / A.V. Cy`sar` // Marketing i marketingovy`e issledovaniya. – 2002. – #5. – S.57. – In Russian.

4. Mal`kova I.V. Loyal`nost` potrebitelej kak konkurentnoe preimushhestvo kompanii / I.V. Mal`kova // Vestn. Mosk. un-ta. Seriya 21: Upravlenie (gosudarstvo i obshhestvo). – 2008. – #3. – 140 s. – In Russian.

5. Gembl P. Marketing vzaimootnoshenij s potrebitelyami / P. Gembl, M. Stoun, N. Vudkok. – M.: Izd-vo Torgovy`j dom «Grand», 2002. – 512 s. – In Russian.

6. Kapferer Zhan-Noe`l`. Brend navsegda: sozdanie, razvitie, podderzhka cennosti brenda / Zhan-Noe`l` Kapferer. – M.: Vershina, 2007. – 448 s. – In Russian.

7. Andreev A.G. Loyal`ny`j potrebitel` – osnova dolgosrochnogo konkurentnogo preimushhestva kompanii / A.G. Andreev // Marketing i marketingovy`e issledovaniya. – 2003. – #2. – S.16. – In Russian.

8. Aaker D.A. Sozdanie sil`ny`x brendov / D.A. Aaker. – M: Izdatel`skij dom Grebennikova, 2003. – 440 s. – In Russian.

9. Sajt kompanii «LAJNSERVIS» [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.ls-crm.ru/ru/info/. – In Russian.

10. Sajt AdMe-Sibir`. Specializirovanny`j internet-resurs v oblasti reklamy`, marketinga i PR Sibiri / I. Shishhenko. – Marketing – programmy` loyal`nosti [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://sib.adme.ru/peshehod/marketing-programmy-loyalnosti-petrapromo-7199/#comment_list. – In Russian.

CRM AS EFFECTIVE INSTRUMENT ENHANCING FMCG BRAND COMPETITIVENESS IN MATURE SATURATED MARKETS

S.G. DOBRYDNEVA
(Rostov State University of Economics)

Customer-oriented CRM strategy integration in the customary marketing instruments of the consumer loyalty management is tried out. A consistent positive effect that fosters customer centricity of a brand and helps manufacturers in achieving strategic goals is derived.
Keywords: *CRM, customer loyalty, FMCG, day-to-day demand, competitiveness, saturated markets.*

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.865.8

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МЕХАТРОННО-МОДУЛЬНОГО РОБОТА

П.В. ГЕРАСИН, Ю.С. РЕДЬКО, В.В. МАРТЫНОВ
(Донской государственный технический университет)

Проанализированы актуальность и сфера применения модульных роботов, состоящих из однотипных модулей. Разработана кинематическая модель и на ее основе составлена программа визуализации движения одного из таких роботов. Полученные результаты могут быть использованы при отработке системы интеллектуального управления движением таких роботов.
Ключевые слова: *мехатроника, модульные роботы, кинематическая модель, визуализация движения, экстремальная робототехника.*

Введение. Разработка модульных роботов (МР) с адаптивной кинематической структурой в настоящее время является одним из перспективных направлений мехатроники. МР состоят из однотипных модулей, объединенных в единую многозвенную конструкцию, а соединение таких модулей позволяет создавать различные по структуре механизмы. По сравнению с обычными мобильными роботами МР обладают серьезными преимуществами, среди которых надежность и способность преодолевать сложные препятствия. В МР используются новейшие достижения робототехники, мехатроники, теории управления (в том числе интеллектуальное управление движением). Одна из основных областей применения МР – экстремальная робототехника [1]. К сожалению, в литературе практически отсутствует информация о внутренней структуре, алгоритмах и программном обеспечении, используемых для управления перемещением и реконфигурацией таких роботов. Из отечественных работ следует упомянуть статью [2], в которой рассмотрено движение одномерного МР по плоской поверхности.

Разработка кинематической схемы и программа визуализации. Нами исследована визуализация волнообразного взаимного смещения модулей МР, приводящего к его продольному перемещению. Приняты следующие допущения и ограничения: все модули имеют одинаковые геометрические размеры; каждый из модулей состоит из головного и хвостового звеньев одинаковой длины и бесконечной жесткости; звенья соединены безлюфтовым шарниром с одной степенью подвижности, допускающим их взаимный поворот на угол $\pm(\pi-\gamma)$. Угол γ определяется конструктивными ограничениями используемых в модулях МР шарниров. Начало неподвижной декартовой системы координат связано с начальным положением «кончика хвоста» первого модуля. Направление оси OX совпадает с направлением движения МР. Ось OY повернута относительно оси OX на угол $\pi/2$ против часовой стрелки (на рис.1 оси координат не показаны). Звенья каждого модуля условно обозначены отрезками прямых: черными – для голов-

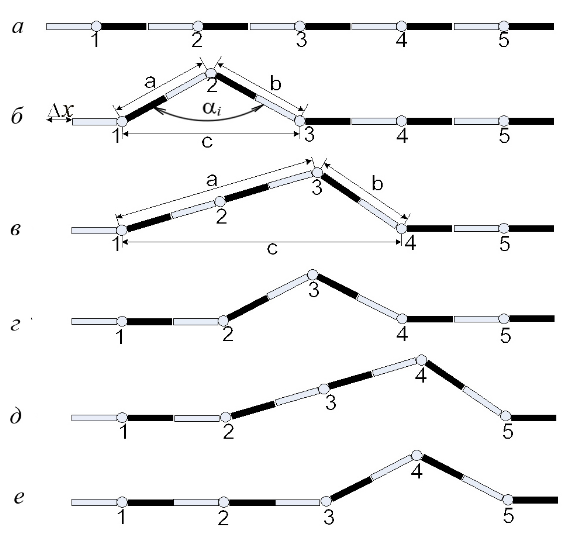


Рис.1. Стадии цикла одного перемещения МР

ного, т.е. первого по направлению движения МР, белыми – для хвостового звеньев (см. рис.1, на котором показана последовательность прохождения волны по длине модуля). Номера модулей обозначены цифрами у соответствующих шарниров. Звенья каждого i-го модуля образуют между собой углы α_i, где i – порядковый номер модуля, начиная с крайнего левого.

На примере МР, состоящего из n=5 последовательно соединенных модулей, составлена кинематическая модель. Анализ кинематики движения МР позволил составить уравнения, описывающие изменения углов при вершинах модулей в зависимости от времени. Обозначив длину одного звена модуля через l, запишем выражение для максимально допустимого перемещения МР за один цикл движения как $\Delta x_{\max} = 2l(2-\sqrt{2(1-\cos\gamma)})$ (величина $\Delta x_{\max}$ ограничивается параметром γ). Угол α_i, при котором будет обеспечено заданное перемещение Δx (например, при вершине модуля 2 на рис.1, стадия *б*), составит:

$$\alpha_2 = \arccos\frac{8l\Delta x - 8l^2 - (\Delta x)^2}{8l^2}.$$

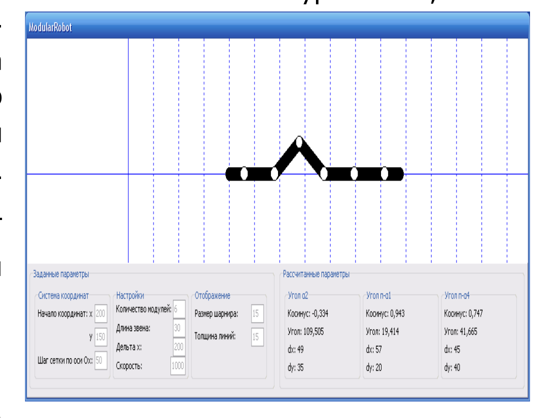


Рис.2. Интерфейс программы «ModularRobot»

При прохождении волны по длине робота угол при шарнире модуля 2 проходит через значение α_2=π (см. рис.1, стадия *в*), которому соответствуют значения углов при шарнирах 1 и 4:

$$\alpha_1 = \arccos\frac{48l^2 - 12l\Delta x + (\Delta x)^2}{8l(\Delta x - 6l)},$$

$$\alpha_4 = \arccos\frac{24l^2 - 12l\Delta x + (\Delta x)^2}{4l\Delta x - 24l^2}.$$

Перемещение МР обеспечивается за счет последовательного воспроизведения повторяющихся движений всеми модулями МР как элементами кинематической цепи, в результате чего от первого модуля к последнему «пробегает» волна и весь МР продвигается вперед на расстояние Δx. Задачей системы управления перемещением робота является согласованная отработка углов в шарнирах модулей. На основе кинематической модели разработана программа «ModularRobot» (рис.2), позволяющая визуализировать перемещение МР при последовательном выполнении движений каждым звеном, что в дальнейшем будет использовано при отработке интеллектуальной системы управления движением таких роботов. Визуализация может быть реализована в любом назначенном оператором масштабе времени.

Заключение. В результате проведенных исследований разработана кинематическая модель многозвенного модульного робота и программа визуализации его движения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке интеллектуальной системы управления движением и реконфигурацией модульных роботов в условиях неопределенности внешней среды.

Библиографический список

1. Роботы и робототехника. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://insiderobot.blogspot.com.

2. Макаров И.М. Алгоритмы управления движением многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой / И.М. Макаров [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – №3. – С.2-9.

Материал поступил в редакцию 18.04.2011.

References

1. Roboty` i robototexnika. [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://insiderobot.blogspot.com. – In Russian.
2. Makarov I.M. Algoritmy` upravleniya dvizheniem mnogozvenny`x mexatponno-modul`ny`x robotov s adaptivnoj kinematicheskoj strukturoj / I.M. Makarov [i dr.] // Mexatronika, avtomatizaciya, upravlenie. – 2008. – #3. – S.2-9. – In Russian.

MECHATRONIC-MODULAR ROBOT MOVEMENT VISUALIZATION

P.V. GERASIN, Y.S. REDKO, V.V. MARTYNOV
(Don State Technical University)

The urgency and application of the single-type modular robots is considered. The kinematical model-based program of such robot movement visualization is worked out. The obtained results can be used for the development of the intelligent manipulation of the robot movement.
Keywords: *mechatronics, modular robots, kinematical model, movement visualization, extremal robotics.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АЙДИНЯН Андрей Размикович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета.
andstyle@mail.ru

АЛЬ-ХУЛАЙДИ Абдулмаджид Ахмед, аспирант кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета.
admin@abdulmajed.8m.net
alkhulaidi_2006@hotmail.com

АНЦУПОВА Александра Александровна, аспирантка кафедры «Маркетинг и реклама» Ростовского государственного экономического университета «РИНХ».
a.antsupova@mail.ru

БАСОВА Алина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета.
abasova@donstu.ru

БЕЛЯВСКИЙ Павел Геннадьевич, начальник группы ООО «Спецморстрой».
epron1@yandex.ru

ВАСИЛЬЕВ Борис Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета.

ВИНОКУРОВ Михаил Романович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электроника» Донского государственного технического университета.
vmr125@mail.ru

ГЕРАСИН Павел Владимирович, магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета.
gpv2007@mail.ru

ГЕТМАН Борис Михайлович, доцент кафедры «Экономика» Донского государственного технического университета.
751050@mail.ru

ГРИШИН Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная и компьютерная графика» Донского государственного технического университета.
sgrichin@dstu.edu.ru

ДОБРЫДНЕВА Светлана Геннадьевна, аспирантка кафедры «Коммерция и маркетинг» Ростовского государственного экономического университета «РИНХ».
s_dobrydneva@dontabak.ru

ДУДНИК Виталий Владимирович, кандидат технических наук, доцент Донского государственного технического университета.
vvdudnik@mail.ru

ЖУКОВ Артур Владимирович, офицер отделения анализа результатов испытаний испытательного центра в/ч 85907.
Renkel@mail.ru

ЗАЙЦЕВА Мария Владиславовна, студентка факультета «Нанотехнологии и композиционные материалы» Донского государственного технического университета.
zajceva5@rambler.ru

КАРПИНСКИЙ Дмитрий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории упругости Южного федерального университета.
karp@math.rsu.ru

КИРЕЕВ Сергей Олегович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета.
kireevso@yandex.ru

КОЛОТ Владимир Александрович, аспирант кафедры «Автоматизация и электропривод станочных систем» Донского государственного технического университета.
bobahhe@mail.ru

КОРОЛЬКОВ Юрий Вячеславович, руководитель сектора научно-исследовательской работы студентов и работы с молодыми учеными Донского государственного технического университета.
kingkov@mail.ru

КОСТИН Алексей Михайлович, начальник отдела испытательного центра в/ч 85907.
Renkel@mail.ru

МАРТЫНОВ Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета.
vlama@list.ru

МАСЛОВЦЕВА Надежда Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и теплоэнергетика» Рудненского индустриального института.
zoloto_ewa@mail.ru

МОИСЕЕНКО Андрей Александрович, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета.
cppde@gmail.com

НЕЙДОРФ Рудольф Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета.
neyruan@yandex.ru

НЕНАХОВА Ольга Александровна, старший преподаватель кафедры «Экономика» Донского государственного технического университета.
751050@mail.ru

ОЗЯБКИН Андрей Львович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные машины и триботехника» Ростовского государственного университета путей сообщения.
zyabkin@mail.ru

ОСЯЕВ Олег Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры «Материаловедение и ремонт ракетного вооружения» Ростовского военного института ракетных войск.
Osyevog@Mail.Ru

ПЕВЧЕВ Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Тольяттинского государственного университета.
v.pevchev@tltsu.ru.

ПОЛУШКИН Олег Олегович, кандидат технических наук, докторант кафедры «Теория механизмов и машин» Донского государственного технического университета.
grunt@mail.ru

ПУСТОВОЙТ Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, заведующий кафедрой «Физическое и прикладное материаловедение» Донского государственного технического университета.
fipm-dstu@mail.ru

РЕДЬКО Юлия Сергеевна, магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета.
rsergeevna@mail.ru

РОЖНЕНКО Оксана Анатольевна, научный сотрудник сектора научно-исследовательской работы студентов и работы с молодыми учеными Донского государственного технического университета.
roksana1983@mail.ru

САННИКОВ Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ механики и прикладной математики им. И.И. Воровича Южного федерального университета.
karp@math.rsu.ru

САХАРОВА Людмила Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры математики филиала Морской государственной академии им. адмирала Ф.Ф. Ушакова в г. Ростове-на-Дону.
l_sakharova@mail.ru

СВЕЧНИКОВ Николай Борисович, инженер 2 категории лаборатории математических методов в экономике Сургутского государственного университета Ханты-Мансийского автономного округа - Югры.
nb.svechnikov@rambler.ru

СОБОЛЬ Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии» Донского государственного технического университета.
b.sobol@mail.ru

СПИРИДОНОВА Лидия Васильевна, аспирантка кафедры «Финансы, денежное обращение и кредит» Сургутского государственного университета Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.
Lidia_vik@mail.ru

ТАМАРКИНА Евгения Михайловна, системный администратор Донского государственного технического университета.

ТАТУРИН Юрий Александрович, начальник факультета стартовых технических комплексов ракет и космических аппаратов Ростовского военного института ракетных войск.
Taturin@mail.ru

ТИЩЕНКО Элина Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета.
lina_tishenko@mail.ru

ФИЛИППОВ Антон Владимирович, аспирант кафедры «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» Ухтинского государственного технического университета.
emilen2003@mail.ru

ХЛОПЕНКО Оксана Валерьевна, старший преподаватель кафедры «Экономика» Донского государственного технического университета.
ohlopenko@yandex.ru

ЦВЕТКОВА Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета.
olga_cvetkova@mail.ru

ЧЕРНЫШЁВ Юрий Олегович, доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета.

ЧИСТОВА Виктория Александровна, старший преподаватель кафедры «Экономика» Донского государственного технического университета.

ЯГУБОВ Зафар Хангусейн оглы, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» Ухтинского государственного технического университета.
zyagubov@yandex.ru

INDEX

AIDINYAN, Andrey R., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Computation Systems and Information Security Department, Don State Technical University.
andstyle@mail.ru

AL-KHULAIDI, Abdulmajed A.G., postgraduate student of the Computation Systems and Information Security Department, Don State Technical University.
admin@abdulmajed.8m.net
alkhulaidi_2006@hotmail.com

ANTSUPOVA, Alexandra A., postgraduate student of the Marketing and Advertising Department, Rostov State University of Economics.
a.antsupova@mail.ru

BASOVA, Alina V., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Computation Systems and Information Security Department, Don State Technical University.
abasova@donstu.ru

BELYAVSKIY, Pavel G., chief of the section, LLC 'Spetsmorstroi'.
epron1@yandex.ru

CHERNYSHEV, Yury O., PhD in Science, professor of the Computation Systems and Information Security Department, Don State Technical University.

CHISTOVA, Victoria A., senior lecturer of the Economics Department, Don State Technical University.

DOBRYDNEVA, Svetlana G., postgraduate student of the Commerce and Marketing Department, Rostov State University of Economics.
s_dobrydneva@dontabak.ru

DUDNIK, Vitaly V., Candidate of Science in Engineering, associate professor, Don State Technical University.
vvdudnik@mail.ru

FILIPPOV, Anton V., postgraduate student of the Electric Drive and Production Plants and Technological Complexes Automation Department, Ukhta State Technical University.
emilen2003@mail.ru

GERASIN, Pavel V., undergraduate of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University.
gpv2007@mail.ru

GETMAN, Boris M., associate professor of the Economics Department, Don State Technical University.
751050@mail.ru

GRISHIN, Sergey A., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Engineering and Computer Graphics Department, Don State Technical University.
sgrichin@dstu.edu.ru

KARPINSKIY, Dmitry N., PhD in Physics and Maths, professor of the Elastic Theory Department, Southern Federal University.
karp@math.rsu.ru

KHLOPENKO, Oxana V., senior lecturer of the Economics Department, Don State Technical University.
ohlopenko@yandex.ru

KIREYEV, Sergey O., PhD in Science, professor, head of the Machinery and Equipment for Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University.
kireevso@yandex.ru

KOLOT, Vladimir A., postgraduate student of the Automation and Machine Tool Electric Drive, Don State Technical University.
bobahhe@mail.ru

KOROLKOV, Yury V., chief of the Students Research and Work with Young Researchers Sector, Don State Technical University.
kingkov@mail.ru

KOSTIN, Alexey M., chief of the department, Testing Centre, Troop Unit 85907.
renkel@mail.ru

MARTYNOV, Vladimir V., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University.
vlama@list.ru

MASLOVTSEVA, Nadezhda Y., senior lecturer of the Electrical Power and Heat Engineering Department, Rudny Industrial Institute.
zoloto_ewa@mail.ru

MOISEYENKO, Andrey A., postgraduate student of the Theoretical and General Electric Engineering Department, Omsk State Technical University.
cppde@gmail.com

NENAKHOVA, Olga A., senior lecturer of the Economics Department, Don State Technical University.
751050@mail.ru

NEYDORF, Rudolph A., PhD in Science, professor, head of the Computer Software and Automated Systems Department, Don State Technical University.
neyruan@yandex.ru

OSYAEV, Oleg G., Candidate of Science in Engineering, associate professor, senior lecturer of the Science of Materials and Rocketry Maintenance Department, Rostov Military Institute of Rocket Forces.
osyevog@mail.ru

OZYABKIN, Andrey L., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Transport Machines and Triboengineering Department, Rostov State Transport University.
zyabkin@mail.ru

PEVCHEV, Vladimir P., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Industrial Electronics Department, Togliatti State University.
v.pevchev@tltsu.ru

POLUSHKIN, Oleg O., Candidate of Science in Engineering, postdoctoral student of the Theory of Mechanisms and Machines Department, Don State Technical University.
grunt@mail.ru

PUSTOVOIT, Victor N., PhD in Science, professor, head of the Material Physics and Engineering Department, Don State Technical University.
fipm-dstu@mail.ru

REDKO, Yulia S., undergraduate of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University.
rsergeevna@mail.ru

ROZHNENKO, Oxana A., research scholar of the Students Research and Work with Young Researchers Sector, Don State Technical University.
roksana1983@mail.ru

SAKHAROVA, Lyudmila V., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Mathematics, Admiral Ushakov Maritime State Academy, Rostov-on-Don branch.
l_sakharova@mail.ru

SANNIKOV, Sergey V., Candidate of Science in Physics and Maths, senior research scholar, I. I. Vorovich Research Institute of Mechanics and Applied Maths, Southern Federal University.
karp@math.rsu.ru

SOBOL, Boris V., PhD in Science, professor, head of the Information Technologies Department, Don State Technical University.
b.sobol@mail.ru

SPIRIDONOVA, Lidia V., postgraduate student of the Finance, Currency Circulation and Credit Department, Surgut State University, Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra.
lidia_vik@mail.ru

SVECHNIKOV, Nikolay B., second rank engineer of the Laboratory of Mathematical Methods in Economics, Surgut State University, Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra.
nb.svechnikov@rambler.ru

TAMARKINA, Evgenia M., system administrator, Don State Technical University.

TATURIN, Yury A., head of the Launch Technical Missile Systems and Spacecrafts Faculty, Rostov Military Institute of Rocket Forces.
taturin@mail.ru

TISHCHENKO, Elina E., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Engineering Technology Department, Don State Technical University.
lina_tishenko@mail.ru

TSVETKOVA, Olga L., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Computing Systems and Information Security Department, Don State Technical University.
olga_cvetkova@mail.ru

VASILYEV, Boris N., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Machinery and Equipment for Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University.

VINOKUROV, Mikhail R., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the Electrical and Electronics Engineering Department, Don State Technical University.
vmr125@mail.ru

YAGUBOV, Zafar Khangusein-ogly, PhD in Science, professor, head of the Electric Drive and Automatics of Plants and Technological Complexes Department, Ukhta State Technical University.
zyagubov@yandex.ru

ZAITSEVA, Maria V., student of the Nanotechnologies and Composite Materials Department, Don State Technical University.
zajceva5@rambler.ru

ZHUKOV, Artur V., officer of the Post-Test Analysis Subdivision, Testing Centre, Troop Unit 85907.
renkel@mail.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. Статья должна быть представлена в распечатанном виде и на магнитном носителе в электронной версии с расширением doc. Шрифт Times New Roman. Кегль - 14. Межстрочный интервал для текста - 1,5. Бумага белая формата А4.

2. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности: полное название статьи; инициалы и фамилии авторов, место работы; аннотация (max 400 символов, включая пробелы); ключевые слова (max 150 символов). Затем идет текст самой статьи, библиографический список, сведения об авторах (ФИО, научная степень, звание, должность и место работы, e-mail).

3. Дополнительно к статье должны быть представлены следующие материалы на английском языке: ФИО авторов, полное название статьи, аннотация (полная аналогия русской версии), ключевые слова, сведения об авторах.

4. Статья должна предусматривать разделы: введение (постановка задачи), основную часть (название), выводы или заключение.

5. Объем статьи не должен превышать 16 страниц машинописного текста, 5 рисунков или фотографий; обзора - 25 страниц, 10 рисунков; краткого сообщения - не более 3 страниц, 2 рисунков.

6. Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Каждый рисунок должен иметь подпись. Рисунки должны иметь контрастное изображение. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в формульном редакторе MS Word.

7. Размерность физических величин, используемых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.).

8. Библиографический список должен включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг - фамилию и инициалы автора, название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

9. При представлении материала на рассмотрение в редакцию необходимо наличие внешней рецензии, подписанной специалистом, имеющим ученую степень доктора наук (обязательно заверенной в отделе кадров по месту работы рецензента). К статьям аспирантов и соискателей необходимо приложить отзыв научного руководителя. Для авторов, не являющихся сотрудниками ДГТУ, необходима рекомендация на имя главного редактора, подписанная научным руководителем автора (для соискателей ученой степени) или руководителем подразделения (обязательно заверенная печатью).

10. Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

11. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются, рукописи и магнитные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлегией окончательного текста статьи.

12. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Более подробно с правилами оформления можно ознакомиться на сайте журнала "Вестник ДГТУ" по адресу http://vestnik.dstu.edu.ru